

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MATHEUS BAZO DO NASCIMENTO

SESSENTA ANOS DE *SHOP SCHEDULING*: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA

CURITIBA

2017

MATHEUS BAZO DO NASCIMENTO

SESSENTA ANOS DE *SHOP SCHEDULING*: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA
LITERATURA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Produção,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do
Paraná, como requisito parcial à obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2017

N244 Nascimento, Matheus Bazo do
Sessenta anos de Shop Scheduling: uma revisão sistemática da literatura
/ Matheus Bazo do Nascimento. – Curitiba, 2017.
492 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2017.

Orientador: Cassius Tadeu Scarpin .
Bibliografia: p. 449-492.

1. Engenharia de Produção. 2. Shop Scheduling. 3. Taxonomia. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Scarpin, Cassius Tadeu. III. Título.

CDD: 658.5





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

TERMO DE APROVAÇÃO

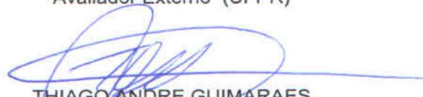
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MATHEUS BAZO DO NASCIMENTO** intitulada: **SESSENTA ANOS DE SHOP SCHEDULING: UMA REVISAO SISTEMATICA DA LITERATURA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 09 de Fevereiro de 2017.


CASSIUS TADEU SCARPIN
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


FABIANO OSCAR DROZDA
Avaliador Interno (UFPR)


GUSTAVO VALENTIM LOCH
Avaliador Externo (UFPR)


THIAGO ANDRE GUIMARAES
Avaliador Externo (IFPR)

Ao meu pai Joel e à minha mãe Rita, em razão de seu incomensurável esforço e contribuição à minha formação como homem e cidadão, dedico esse trabalho com todo o meu amor, admiração e afeto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Joel e Rita, por tudo que fizeram e ainda fazem por mim e por toda paciência que tiveram comigo, para que eu pudesse avançar na minha formação acadêmica. Sem o apoio e reconhecimento deles, nada disso teria sido possível ou valido a pena.

Aos meus avós, Eugênio e Marivalda, que são meus exemplos de vida desde a minha mais tenra idade, que sempre me ajudaram e me ofereceram seu carinho e seus conselhos, aqueles com quem sempre eu pude contar em meus momentos mais difíceis.

Ao meu orientador, Cassius, cuja luta e perseverança servem de inspiração pra mim durante todos os dias. Sou eternamente grato pela paciência e confiança depositadas em mim e no meu trabalho. Saiba que a sua crença nesta dissertação é o que torna o árduo momento de escrita desta mais prazeroso e regozijante.

Aos meus amigos do GTAO, que fazem do ambiente de estudo um lugar aprazível e descontraído. Quero agradecer em especial a duas pessoas. O Guilherme, que é o dínamo do grupo, por conta de seu espírito agregador e inclusivo, faz com que todos sintam-se à vontade no ambiente. E a Eliete, que foi quem mais esteve comigo durante todo esse tempo, sempre solícita, sempre disposta a ouvir e ajudar a mim e aos demais.

Aos professores que fazem parte do GTAO, pelo auxílio e pelo conhecimento compartilhado. Ao Thiago, cuja ideia colocada em sua tese é um dos grandes sustentáculos desse trabalho.

Ao meu amigo Thiago, que mesmo hoje em dia distante, sempre me apoia, me incentiva, me faz acreditar que eu posso e sempre me impulsiona a alçar voos maiores.

E, por fim, à Deus, pois sem a proteção e o amor Dele, nada seria possível.

Ever tried. Ever Failed.

No Matter. Try Again.

Fail Again. Fail Better.

Samuel Beckett

RESUMO

Desde o seminal artigo de Johnson em 1954, a Programação da Produção em *Shop Scheduling* tem se tornado uma área relevante dentro da Pesquisa Operacional e, atualmente, duzentos trabalhos tangentes à temática são publicados anualmente. Dentre os artigos aqui citados tem-se aqueles que se dedicam à apresentação e síntese do estado da arte desse assunto, intitulados artigos de revisão. Quando tais artigos são elaborados a partir de um conjunto objetivo de critérios, relativos à categorização dos artigos selecionados, tem-se a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). O presente trabalho realiza uma RSL em *Shop Scheduling*, a partir da análise de cada ambiente fabril que o compõe. Fez-se o escrutínio de 560 artigos, à luz de um conjunto de métricas, que constitui a estrutura basilar da proposta de nova taxonomia do *Shop Scheduling*, complementar à notação de Graham, objetivo fulcral do presente trabalho. Além disso, utilizou-se uma representação em redes dos resultados obtidos em algumas das métricas empregadas, como a característica dos itens, algo outrora inaudito em estudos de revisão desse assunto. Ademais, outro ponto relevante desse estudo repousa na identificação de campos pouco explorados, de modo a colaborar com a pesquisa futura neste tomo.

Palavras-chave: *Shop Scheduling*. Revisão Sistemática da Literatura. Taxonomia. Representação em Redes.

ABSTRACT

Since Johnson's seminal article in 1954, Shop Scheduling in Production Scheduling has become a relevant area within Operational Research, and currently hundreds of tangential works on the subject are published annually. Among the articles cited here are those dedicated to the presentation and synthesis of the state of the art of this subject, which are entitled review articles. When these articles are elaborated from an objective set of criteria, regarding the categorization of the selected articles, we have the Systematic Review of Literature (SLR). The present work performs a SLR in Shop Scheduling, based on the analysis of each manufacturing environment that composes it. There were 560 articles scrutinized based on a set of metrics, which is the basic structure of the proposed new Taxonomy of Shop Scheduling, complementary to Graham's notation, the main objective of this work. In addition to that a network representation of the results was obtained in some of the metrics used, such as the job characteristics, something previously unheard of in review studies of this subject. Moreover, another relevant point of this study lies in the identification of less explored fields in order to collaborate with future research in this matter.

Keywords: Shop Scheduling. Systematic Literature Review. Taxonomy. Network Representation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE MÁQUINAS PARALELAS ...	41
FIGURA 2 – FLOW SHOP PURO	43
FIGURA 3 – GRÁFICO DE GANTT DE UM EXEMPLO DE JOB SHOP.....	45
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DE UM OPEN SHOP COM MÁQUINAS PARALELAS	47
FIGURA 5 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO FLOW SHOP.....	97
FIGURA 6 – CLASSIFICAÇÃO DO FLOW SHOP QUANTO AO TIPO.....	98
FIGURA 7 – TAXONOMIA DO FLOW SHOP QUANTO À CLASSE DA PROGRAMAÇÃO.....	100
FIGURA 8 – NÚMERO DE ARTIGOS DE FLOW SHOP POR MODO DE CHEGADA	102
FIGURA 9 – FLOW SHOP QUANTO À NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS..	103
FIGURA 10 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979).....	105
FIGURA 11 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989).....	108
FIGURA 12 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999).....	110
FIGURA 13 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – PARTE I	113
FIGURA 14 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – PARTE II	115
FIGURA 15 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I	117
FIGURA 16 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II	119
FIGURA 17 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979).....	121
FIGURA 18 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989).....	123
FIGURA 19 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999).....	125

FIGURA 20 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009)	127
FIGURA 21 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015)	
– PARTE I	129
FIGURA 22 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015)	
– PARTE II	131
FIGURA 23 – TIPOS DE MÉTODOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)	133
FIGURA 24 – TIPOS DE MÉTODOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989)	135
FIGURA 25 – TIPOS DE MÉTODOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999)	137
FIGURA 26 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009)	144
FIGURA 27 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015)	151
FIGURA 28 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)	154
FIGURA 29 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989)	157
FIGURA 30 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA III	167
FIGURA 31 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA IV	176
FIGURA 32 – PERIÓDICOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)	192
FIGURA 33 – PERIÓDICOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989)	194
FIGURA 34 – PERIÓDICOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999)	196
FIGURA 35 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010)	198
FIGURA 36 – PERIÓDICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015)	200
FIGURA 37 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO JOB SHOP	232
FIGURA 38 – TAXONOMIA DO JOB SHOP QUANTO AO TIPO	233
FIGURA 39 – JOB SHOP QUANTO À CLASSE DA PROGRAMAÇÃO	235
FIGURA 40 – TAXONOMIA DO JOB SHOP QUANTO AO MODO DE CHEGADA	236
FIGURA 41 – JOB SHOP QUANTO À NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS	238
FIGURA 42 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)	240
FIGURA 43 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – JOB SHOP	242

FIGURA 44 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – JOB SHOP	244
FIGURA 45 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE I).....	248
FIGURA 46 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE II).....	250
FIGURA 47 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP (PARTE I).....	252
FIGURA 48 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP (PARTE II).....	254
FIGURA 49 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)	256
FIGURA 50 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – JOB SHOP	258
FIGURA 51 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – JOB SHOP (PARTE I).....	261
FIGURA 52 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO TERCEIRO PERÍODO – JOB SHOP (PARTE II).....	264
FIGURA 53 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE I).....	267
FIGURA 54 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE II).....	269
FIGURA 55 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP (PARTE I).....	271
FIGURA 56 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP (PARTE II).....	273
FIGURA 57 – TIPOS DE MÉTODOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)	275
FIGURA 58 – TIPOS DE MÉTODOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – JOB SHOP	277
FIGURA 59 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – JOB SHOP	281
FIGURA 60 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP	289

FIGURA 61 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP	296
FIGURA 62 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)	300
FIGURA 63 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – JOB SHOP	303
FIGURA 64 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – JOB SHOP	310
FIGURA 65 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP	321
FIGURA 66 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA V (JOB SHOP)	330
FIGURA 67 – PERIÓDICOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979).....	332
FIGURA 68 – PERIÓDICOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – JOB SHOP	333
FIGURA 69 – PERIÓDICOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – JOB SHOP	335
FIGURA 70 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE I).....	337
FIGURA 71 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE II).....	339
FIGURA 72 – PERIÓDICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP (PARTE I).....	341
FIGURA 73 – PERIÓDICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – JOB SHOP (PARTE II).....	343
FIGURA 74 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO OPEN SHOP.....	377
FIGURA 75 – CLASSIFICAÇÃO DO OPEN SHOP QUANTO AO TIPO	378
FIGURA 76 – OPEN SHOP QUANTO À CLASSE DA PROGRAMAÇÃO	380
FIGURA 77 – TAXONOMIA DO OPEN SHOP QUANTO AO MODO DE CHEGADA	381
FIGURA 78 – OPEN SHOP QUANTO À NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS	382
FIGURA 79 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)	384

FIGURA 80 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)	386
FIGURA 81 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)	388
FIGURA 82 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015)	390
FIGURA 83 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)	392
FIGURA 84 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)	393
FIGURA 85 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)	395
FIGURA 86 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015)	397
FIGURA 87 – TIPOS DE MÉTODOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)	399
FIGURA 88 – TIPOS DE MÉTODOS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)....	401
FIGURA 89 – TIPOS DE MÉTODOS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)....	403
FIGURA 90 – TIPOS DE MÉTODOS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015).....	405
FIGURA 91 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)	407
FIGURA 92 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)	408
FIGURA 93 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)	410
FIGURA 94 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA IV (OPEN SHOP)	412
FIGURA 95 – PERIÓDICOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989).....	414
FIGURA 96 – PERIÓDICOS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)	416
FIGURA 97 – PERIÓDICOS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009).....	418
FIGURA 98 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015)	420
FIGURA 99 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO SHOP SCHEDULING.....	428
FIGURA 100 – SHOP SCHEDULING QUANTO AO TIPO (EM %).....	428
FIGURA 101 – SHOP SCHEDULING QUANTO À CLASSE (EM %).....	430
FIGURA 102 – SHOP SCHEDULING QUANTO AO MODO DE CHEGADA (EM %)	431

FIGURA 103 – SHOP SCHEDULING QUANTO À NATUREZA DOS DADOS (EM %)	
.....	432
FIGURA 104 – CARACTERÍSTICAS MAIS ESTUDADAS EM SHOP SCHEDULING	
.....	432
FIGURA 105 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE MAIS ESTUDADOS EM SHOP SCHEDULING.....	434
FIGURA 106 – SHOP SCHEDULING POR TIPO DE MÉTODO (EM %).....	436
FIGURA 107 – MÉTODOS RESOLUTIVOS MAIS USADOS NO SHOP SCHEDULING	
.....	437
FIGURA 108 – PERCENTUAL DE PERIÓDICOS POR AMBIENTE FABRIL	439
FIGURA 109 – PERIÓDICOS QUE MAIS PUBLICAM EM SHOP SCHEDULING ..	439

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	OBJETIVOS	25
1.1.1	Objetivo geral	25
1.1.2	Objetivos específicos	26
1.2	JUSTIFICATIVA	26
1.3	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	26
1.4	ESTRUTURA	27
2	REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	29
2.2	TERMINOLOGIAS EMPREGADAS	30
2.3	PRESSUPOSTOS CLÁSSICOS	35
2.4	NOTAÇÃO DE GRAHAM	37
2.5	PROPOSTA TAXONÔMICA	38
2.6	TRABALHOS CORRELATOS	39
2.7	AMBIENTES FABRIS	41
2.7.1	Máquinas Paralelas	41
2.7.2	Flow Shop	43
2.7.3	Job Shop	45
2.7.4	Open Shop	46
3	MODELOS MATEMÁTICOS DE SHOP SCHEDULING	48
3.1	FLOW SHOP	48
3.1.1	Flow Shop sem espera	48
3.1.2	Flow Shop Permutacional	49
3.1.2.1	Modelo de Wagner	51
3.1.2.2	Modelo de Wilson	51
3.1.2.3	Modelo Adaptado de Manne	52
3.1.2.4	Modelo de Liao-You	53
3.1.3	Flow Shop com Bloqueio	54
3.1.4	Flow Shop sem tempo ocioso	57
3.1.5	Flow Shop com Setup Dependente da Sequência	58
3.2	JOB SHOP	60
3.2.1	Job Shop com setups separáveis e dependentes da sequência	60

3.2.2	Job Shop com setup dependente da sequência e restrições de data de entrega	63
3.2.3	Job Shop com recirculação	64
3.2.4	Job Shop com bloqueio e com máquinas paralelas	67
3.2.5	Job Shop estocástico	70
3.3	OPEN SHOP	73
3.3.1	Open Shop com Preempção	73
3.3.2	Open Shop sem espera	74
3.3.3	Open Shop com multiprocessadores proporcionais	77
3.3.4	Open Shop com Setup Dependente da Sequência	80
3.3.5	Open Shop com objetivo de minimizar a soma dos tempos de conclusão quadráticos	83
4	METODOLOGIA	86
4.1	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	86
4.2	DESCRIÇÃO METODOLÓGICA	86
5	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DE FLOW SHOP	91
5.1	ANO	97
5.2	TIPO	97
5.3	CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	100
5.4	MODO DE CHEGADA DOS ITENS	101
5.5	NATUREZA DA GERAÇÃO DOS DADOS	103
5.6	CARACTERÍSTICA DOS ITENS	104
5.6.1	Primeiro Período (1954 – 1979)	105
5.6.2	Segundo Período (1980 – 1989)	107
5.6.3	Terceiro Período (1990 – 1999)	109
5.6.4	Quarto Período (2000 – 2009)	111
5.6.4.1	Quarto Período – Parte I	112
5.6.4.2	Quarto Período – Parte II	114
5.6.5	Quinto Período (2010 – 2015)	116
5.6.5.1	Quinto Período – Parte I	116
5.6.5.2	Quinto Período – Parte II	118
5.7	CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE	120
5.7.1	Primeiro Período (1954 – 1979)	120
5.7.2	Segundo Período (1980 – 1989)	122

5.7.3 Terceiro Período (1990 – 1999)	124
5.7.4 Quarto Período (2000 – 2009)	126
5.7.5 Quinto Período (2010 – 2015).....	128
5.7.5.1 Quinto Período – Parte I	128
5.7.5.2 Quinto Período – Parte II	130
5.8 TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS	132
5.8.1 Primeiro Período (1954 – 1979)	133
5.8.2 Segundo Período (1980 – 1989).....	134
5.8.3 Terceiro Período (1990 – 1999)	136
5.8.4 Quarto Período (2000 – 2009)	138
5.8.4.1 Método exato	139
5.8.4.2 Método heurístico.....	140
5.8.4.3 Outros métodos.....	142
5.8.5 Quinto Período (2010 – 2015).....	145
5.8.5.1 O método exato	145
5.8.5.2 Método heurístico.....	146
5.8.5.3 Híbridos	148
5.8.5.4 Outros métodos.....	150
5.9 MÉTODOS RESOLUTIVOS.....	152
5.9.1 Primeiro Período (1954 – 1979)	153
5.9.2 Segundo Período (1980 – 1989).....	156
5.9.3 Terceiro Período (1990 – 1999)	159
5.9.3.1 Métodos exatos no Terceiro Período	159
5.9.3.2 Heurísticas – Parte I.....	161
5.9.3.3 Heurísticas – Parte II.....	164
5.9.3.4 Outros métodos.....	165
5.9.4 Quarto Período (2000 – 2010)	168
5.9.4.1 Métodos exatos.....	168
5.9.4.2 Heurísticas – Parte I.....	170
5.9.4.3 Heurísticas – Parte II.....	172
5.9.4.4 Heurísticas – Parte III.....	173
5.9.4.5 Outros métodos.....	175
5.9.5 Quinto Período (2010 – 2015).....	177
5.9.5.1 Métodos exatos.....	177

5.9.5.2	Heurísticas – Parte I.....	180
5.9.5.3	Heurísticas – Parte II.....	182
5.9.5.4	Métodos híbridos – Parte I.....	184
5.9.5.5	Métodos híbridos – Parte II.....	185
5.9.5.6	Meta-heurísticas – Parte I.....	187
5.9.5.7	Meta-heurísticas – Parte II.....	189
5.9.5.8	Outros métodos.....	190
5.10	PERIÓDICOS.....	191
5.10.1	Primeiro Período (1954 – 1979).....	191
5.10.2	Segundo Período (1980 – 1989).....	192
5.10.3	Terceiro Período (1990 – 1999).....	195
5.10.4	Quarto Período (2000 – 2010).....	197
5.10.5	Quinto Período (2010 – 2015).....	199
5.11	QUADRO-SÍNTESE DE FLOW SHOP.....	201
6	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM JOB SHOP.....	226
6.1	ANO.....	232
6.2	TIPO.....	232
6.3	CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO.....	235
6.4	MODO DE CHEGADA DOS ITENS.....	236
6.5	NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS.....	237
6.6	CARACTERÍSTICAS DOS ITENS.....	239
6.6.1	Primeiro Período (1960 – 1979).....	239
6.6.2	Segundo Período (1980 – 1989).....	241
6.6.3	Terceiro Período (1990 – 1999).....	243
6.6.4	Quarto Período (2000 – 2009).....	246
6.6.4.1	Quarto Período – Parte I.....	246
6.6.4.2	Quarto Período – Parte II.....	249
6.6.5	Quinto Período (2010 – 2015).....	251
6.6.5.1	Quinto Período – Parte I.....	251
6.6.5.2	Quinto Período – Parte II.....	253
6.7	CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE.....	255
6.7.1	Primeiro Período (1960 – 1979).....	255
6.7.2	Segundo Período (1980 – 1989).....	257
6.7.3	Terceiro Período (1990 – 1999).....	259

6.7.3.1	Terceiro Período – Parte I	259
6.7.3.2	Terceiro Período – Parte II	262
6.7.4	Quarto Período (2000 – 2009)	265
6.7.4.1	Quarto Período – Parte I	265
6.7.4.2	Quarto Período – Parte II	268
6.7.5	Quinto Período (2010 – 2015)	270
6.7.5.1	Quinto Período – Parte I	270
6.7.5.2	Quinto Período – Parte II	272
6.8	TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS	274
6.8.1	Primeiro Período (1960 – 1979)	274
6.8.2	Segundo Período (1980 – 1989)	275
6.8.3	Terceiro Período (1990 – 1999)	278
6.8.3.1	Métodos heurísticos	278
6.8.3.2	Outros métodos	279
6.8.4	Quarto Período (2000 – 2009)	282
6.8.4.1	Métodos heurísticos – Parte I	282
6.8.4.2	Métodos heurísticos – Parte II	283
6.8.4.3	Métodos meta-heurísticos	285
6.8.4.4	Outros métodos	287
6.8.5	Quinto Período (2010 – 2015)	290
6.8.5.1	Método heurístico – Parte I	290
6.8.5.2	Método heurístico – Parte II	291
6.8.5.3	Método híbrido	293
6.8.5.4	Outros métodos	295
6.9	MÉTODOS RESOLUTIVOS	297
6.9.1	Primeiro Período (1960 – 1979)	297
6.9.2	Segundo Período (1980 – 1989)	301
6.9.3	Terceiro Período (1990 – 1999)	304
6.9.3.1	Heurísticas – Parte I	304
6.9.3.2	Heurísticas – Parte II	306
6.9.3.3	Outros métodos	308
6.9.4	Quarto Período (2000 – 2009)	311
6.9.4.1	Heurísticas – Parte I	311
6.9.4.2	Heurísticas – Parte II	314

6.9.4.3	Meta-heurísticas.....	316
6.9.4.4	Outros métodos.....	319
6.9.5	Quinto Período (2010 – 2015).....	322
6.9.5.1	Heurísticas – Parte I.....	322
6.9.5.2	Heurísticas – Parte II.....	323
6.9.5.3	Heurísticas – Parte III.....	325
6.9.5.4	Métodos híbridos.....	326
6.9.5.5	Outros métodos.....	328
6.10	PERIÓDICOS.....	331
6.10.1	Primeiro Período (1960 – 1979).....	331
6.10.2	Segundo Período (1980 – 1989).....	332
6.10.3	Terceiro Período (1990 – 1999).....	334
6.10.4	Quarto Período (2000 – 2009).....	336
6.10.4.1	Quarto Período – Parte I.....	336
6.10.4.2	Quarto Período – Parte II.....	338
6.10.5	Quinto Período (2010 – 2015).....	340
6.10.5.1	Quinto Período – Parte I.....	340
6.10.5.2	Quinto Período – Parte II.....	342
6.11	QUADRO-SÍNTESE DE JOB SHOP.....	344
7	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM OPEN SHOP.....	375
7.1	ANO.....	377
7.2	TIPO.....	378
7.3	CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO.....	380
7.4	MODO DE CHEGADA DOS ITENS.....	381
7.5	NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS.....	382
7.6	CARACTERÍSTICA DOS ITENS.....	383
7.6.1	Primeiro Período (1976 – 1989).....	383
7.6.2	Segundo Período (1990 – 1999).....	384
7.6.3	Terceiro Período (2000 – 2009).....	387
7.6.4	Quarto Período (2010 – 2015).....	389
7.7	CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE.....	391
7.7.1	Primeiro Período (1976 – 1989).....	391
7.7.2	Segundo Período (1990 – 1999).....	392
7.7.3	Terceiro Período (2000 – 2009).....	394

7.7.4	Quarto Período (2010 – 2015)	396
7.8	TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS	398
7.8.1	Primeiro Período (1976 – 1989)	398
7.8.2	Segundo Período (1990 – 1999)	399
7.8.3	Terceiro Período (2000 – 2009)	402
7.8.4	Quarto Período (2010 – 2015)	404
7.9	MÉTODOS RESOLUTIVOS.....	406
7.9.1	Primeiro Período (1976 – 1989)	406
7.9.2	Segundo Período (1990 – 1999)	407
7.9.3	Terceiro Período (2000 – 2009)	409
7.9.4	Quarto Período (2010 – 2015)	411
7.10	PERIÓDICOS.....	413
7.10.1	Primeiro Período (1976 – 1989)	413
7.10.2	Segundo Período (1990 – 1999)	414
7.10.3	Terceiro Período (2000 – 2009)	417
7.10.4	Quarto Período (2010 – 2015)	419
7.11	QUADRO-SÍNTESE DE OPEN SHOP.....	421
8	ANÁLISE CONJUNTA DOS AMBIENTES DE SHOP SCHEDULING	427
8.1	ANO	427
8.2	TIPO	428
8.3	CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	429
8.4	MODO DE CHEGADA DOS ITENS	430
8.5	NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS	431
8.6	CARACTERÍSTICAS DOS ITENS	432
8.7	CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE	433
8.8	TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS	435
8.9	MÉTODOS RESOLUTIVOS.....	436
8.10	PERIÓDICOS.....	438
8.11	SÍNTESE DA ANÁLISE CONJUNTA DO SHOP SCHEDULING	440
9	CONCLUSÃO	441
	REFERÊNCIAS	449

1 INTRODUÇÃO

A Programação da Produção é uma área de extrema importância para as empresas, posto que seu objetivo precípua é tratar da alocação de recursos escassos às operações produtivas em determinado período de tempo com o objetivo de otimizar um ou mais indicadores de desempenho (LEUNG, 2004; PINEDO, 2012). Neste sentido, define-se em que momento os itens ou operações serão processados por uma ou mais estações de trabalho.

Esta área do conhecimento tem sido estudada desde o início do século passado, fruto do pioneiro trabalho de Henry L. Gantt. Contudo, foi apenas nos anos 1950, com o seminal trabalho de S.M Johnson (1954), que a área teve sua importância reconhecida dentro da Pesquisa Operacional (PO).

A partir de 1950, há uma grande quantidade de livros, artigos e publicações correlatas à temática da Programação da Produção, nas quais diversos conceitos subjacentes a ela têm sido amplamente estudados e publicados em periódicos de grande notoriedade dentro do universo acadêmico. Dentre esses conceitos, talvez o mais nevrálgico seja correlato ao ambiente fabril, isto é, sob que lógica produtiva e padrão de fluxo as tarefas serão processadas pelas máquinas.

Concernente a esse aspecto, quando estudado em sua forma pura, isto é, sem a hibridação entre dois tipos de configuração produtiva, são encontrados cinco tipos de configuração, a saber, a máquina única, máquinas paralelas, o *Flow Shop*, o *Job Shop* e o *Open Shop*. Estes três últimos, por apresentar estações de trabalho em mais de um estágio produtivo, compõem um subconjunto da Programação da Produção, o *Shop Scheduling*, objeto de estudo desse trabalho.

O *Flow Shop* é o ambiente mais estudado nas publicações atinentes ao *Shop Scheduling*, posto que a disposição linear das máquinas e o fluxo unidirecional por (de uma maior quantidade de produtos) elas que o distingue dos demais arranjos produtivos, é comumente encontrado no chão de fábrica das indústrias, em virtude da redução do tempo gasto com *setups* e transportes.

Em seguida, sob o prisma da quantidade de publicações, está o *Job Shop*, cuja característica distintiva é o fluxo não unidirecional dos itens (BAKER; TRIETSCH,

2009). Por se tratar de uma generalização do *Flow Shop*, é um ambiente mais complexo de ser estudado, embora se encontre a aplicabilidade prática deste quando se busca maior variedade de itens em detrimento de um maior volume.

O *Open Shop* distingue-se dos demais ambientes fabris devido à insciência à *priori* da rota de processamento dos itens e operações nas máquinas. Apesar de serem verificadas diversas aplicações desse ambiente na prática, como em oficinas mecânicas (GONZALEZ; SAHNI, 1976), centros de controle de qualidade (LIU; BULFIN, 1987; PRINS, 1994), instalações laboratoriais em centros médicos (MATTA, 2009), entre outros, existe um número menor de publicações correlatas a essa temática.

Um possível motivo dessa baixa exploração acadêmica pode ser devido a sua maior complexidade, explicada até certo ponto pela sua característica distintiva. A arbitrariedade permitida para o processamento torna o espaço de soluções para os problemas concernentes a essa configuração maior do que é verificado nas demais lógicas produtivas.

Tem-se, portanto, uma ampla gama de artigos concernentes a esses três ambientes na literatura. Dentre esses estudos, há aqueles dedicados à síntese do estudo dessa temática, por meio do resgate de publicações anteriores identificadas como as melhores e mais relevantes pelos seus autores. Tal tipo de estudo é denominado na seara acadêmica como artigo de revisão (*review article*). Dentre os estudos aqui categorizados tem-se os trabalhos de Potts e Strusevich (2009) e Annand e Panneerselvam (2015).

Contudo esses estudos apresentam algumas fragilidades, como o foco do primeiro em apresentar uma revisão histórica, em que se mostra os marcos da Programação da Produção. E a apresentação de algumas medidas de desempenho e métodos resolutivos, todavia inexplorando outros aspectos relevantes quando do estudo do *Scheduling*, como as características dos itens.

Quando esse tipo de estudo é concebido à luz de um conjunto objetivo de critérios, sob os quais os estudos serão categorizados e comparados entre si, tem-se o que é denominado de revisão sistemática (*systematic review*). Tal tipo de estudo é

frequentemente encontrado em trabalhos correlatos às Ciências da Saúde, mas sua aplicação é pouco observada no âmbito das Engenharias.

Ao melhor do nosso conhecimento, o presente trabalho introduz a Revisão Sistemática da Literatura (RSL) atinente à Programação da Produção em *Shop Scheduling*. Sob esse prisma, diversas métricas foram utilizadas com o desígnio de classificar os 560 artigos resgatados em periódicos com grande relevância na PO. Identificando-se as similaridades que os estudos conservam entre si, abordando em maior grau os artigos mais relevantes à luz de cada métrica.

Outrossim, apresenta-se graficamente, com o auxílio de um *software* de análise de redes, os resultados obtidos a partir do exame minucioso desses artigos, no que diz respeito a algumas das métricas empregadas na construção de uma nova taxonomia para os problemas de *Shop Scheduling*, como os critérios de otimalidade. Tal representação é inédita em estudos respectivos a essa temática, mas seu uso é verificado em outros campos, como o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos, como no trabalho elaborado por Colicchia e Strozzi (2012).

E, também, identificando possíveis lacunas e campos pouco ou inexplorados na pesquisa concernente a cada um dos ambientes alusivos à temática, as quais podem ser profícuas áreas tangentes à prospecção de trabalhos futuros.

1.1 OBJETIVOS

São aqui apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é propor uma nova e robusta taxonomia para os problemas de *Shop Scheduling*, complementar àquela de Graham, a partir de métricas propostas e, ou, empregadas, com a finalidade de classificar os artigos correlatos a essa temática, aplicando-as na Revisão Sistemática da Literatura desses ambientes.

1.1.2 Objetivos específicos

Para que este objetivo geral seja alcançado são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar um levantamento bibliográfico dos ambientes fabris pertencentes ao escopo do estudo;
- Executar a análise bibliométrica dos problemas de Programação da Produção dos ambientes que compõem o *Shop Scheduling*;
- Apresentar os modelos matemáticos dos principais tipos de cada arranjo produtivo pertencente ao *Shop Scheduling*;
- Identificar lacunas ou pontos pouco explorados na literatura concernente a essa temática, com o intuito de apontar direcionamentos à pesquisa e trabalho futuros;

1.2 JUSTIFICATIVA

A relevância do presente estudo repousa na falta de trabalhos na área da Programação da Produção em que seja realizada a Revisão Sistemática da Literatura. No nosso melhor conhecimento, há falta de trabalhos com critérios bem definidos, à luz do que é proposto na literatura, e com a finalidade precípua de identificar, de maneira sistêmica, áreas outrora pouco ou inexploradas no que concerne ao estudo da Programação da Produção.

1.3 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Para tratar de uma temática tão abrangente como a Programação da Produção, sobretudo em virtude da ampla gama de trabalhos publicados, sejam livros, artigos, que devem ser coletados e escrutinizados, com o propósito de realizar uma adequada revisão da literatura, algumas considerações foram realizadas com o intuito de limitar o escopo do trabalho.

A busca dos artigos foi restrita a trabalhos publicados em periódicos classificados como Q1 e Q2 no SCImago *Journal and Country Rank*, nas áreas de *Management Science and Operational Research*, *Applied Mathematics*, *Industrial and Manufacturing Engineering*, *Decision Sciences*, *Information Systems and Management*, *Modelling and Simulation*, *Strategy and Management*, *Computer Science*, *Computational Mathematics*, *Artificial Intelligence*, *Computer Science Applications*, *Software* e *Statistics and Probability*.

Não pertence ao escopo desse trabalho os trabalhos e publicações correlatas à Programação da Produção em ambientes de máquina única (*Single Machine Shop*). No tangente às máquinas paralelas (*Parallel Machine Shop*) não se faz a revisão sistemática do ambiente, mas este é explicado, por conta de sua presença em estruturas de *Shop Scheduling* mais complexas.

1.4 ESTRUTURA

O presente trabalho está dividido em nove capítulos. O Capítulo 1 traz a introdução, bem como o escopo da pesquisa e seus objetivos.

O Capítulo 2 contém a revisão da literatura, apresentando os conceitos respectivos à Programação da Produção, além de apresentar a taxonomia do *scheduling*, os pressupostos clássicos e o resgate de trabalhos correlatos às revisões de literatura que, em alguma extensão, assemelham-se com o proposto nessa dissertação.

O Capítulo 3 apresenta e descreve os principais modelos matemáticos encontrados em cada um dos três ambientes estudados.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento da presente pesquisa.

Nos Capítulos 5, 6 e 7, são realizadas, à luz das métricas utilizadas, as Revisões Sistemáticas da Literatura do *Flow Shop*, do *Job Shop* e do *Open Shop*, respectivamente, em que se faz uso da inédita representação de redes.

No Capítulo 8 faz-se uma análise conjunta dos ambientes que compõem o *Shop Scheduling*, apresentando-se uma análise quantitativa acerca do que apresenta-se com maior frequência nesses estudos, sob o prisma das métricas propostas.

Por fim o Capítulo 9 traz a conclusão do presente trabalho, em que se sumariza os resultados apresentados e se aponta direcionamentos futuros correlatos às configurações produtivas não pertencentes ao escopo dessa dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, o conceito de Programação será abordado (tempo verbal presente e passado). Sob esse prisma, considerações acerca da terminologia empregada em estudos dessa natureza serão realizadas com o intuito de estruturar o modo de apresentação e discussão dos problemas de *Scheduling*.

Este capítulo também contempla a notação de Graham et al. (1979), a qual tem por finalidade indicar o tipo de problema de Programação da Produção estudado. Trata do que concerne ao ambiente fabril utilizado, às características de processamento dos itens e ao critério de otimalidade considerado quando da resolução desses problemas. Ao fim deste tomo, fez-se o resgate de trabalhos correlatos, representados por alguns artigos que fizeram revisões aprofundadas da literatura no que concerne à temática da Programação da Produção.

2.1 PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

A Programação, ou *scheduling*, pode ser definida como a atividade de alocação de recursos a tarefas em determinados períodos de tempo, com a finalidade de otimizar um ou mais critérios (PINEDO, 2012).

Este campo de estudo, discutivelmente, originou-se com os trabalhos seminais realizados por Gantt (1916), em que explicitamente se discutiu problemas de Programação. Contudo, foi a partir dos anos 1950 que os trabalhos correlatos à temática do *scheduling* foram publicados de maneira continuada. Dentre os quais destaca-se o trabalho de Johnson (1954), considerado como o estudo que evidencia a área da Programação da Produção como um campo independente da Pesquisa Operacional (PO), denotando sua importância.

Nos estudos de *Scheduling*, a temática da complexidade computacional de tais problemas é constantemente abordada, inclusive com trabalhos como o de Yuan et al. (2007), que trata exclusivamente de considerações acerca da complexidade do *scheduling*. Sob esse enquadramento, os problemas de Programação são classificados, em geral, como NP-difícil.

No que diz respeito às aplicações do *scheduling*, pode-se citar a roteirização de veículos (*vehicle scheduling*), como em Mohtashami (2015), problema de escala de trabalhos (*timetabling*), apresentado em Al-Yakoob e Sherali (2015) e a Programação da Produção (*production scheduling*), como, por exemplo, em Jia et al. (2015). Este trabalho abordou tão somente a temática da Programação da Produção. Nas próximas seções, por brevidade, quando do uso do termo utilizado internacionalmente para referir-se à Programação da Produção, apresenta-se apenas como *scheduling*.

2.2 TERMINOLOGIAS EMPREGADAS

Nesta seção faz-se uma descrição das terminologias empregadas no estudo da Programação da Produção. Essa descrição é feita a partir da tradução dos termos utilizados na literatura internacional correlata à temática do *scheduling*, bem como da notação empregada para representar tais termos. São termos utilizados no estudo do *scheduling*:

- Tarefa (*Task* ou *Activity*): na literatura é definida como a menor divisão do trabalho na literatura no que diz respeito à Programação da Produção. Um dos sinônimos para tarefa mais encontrado na literatura é o termo operação. Os modos de representação mais comuns para tarefas ou operações são o termo T ou o termo O . O conjunto de tarefas ou operações forma o que se denomina na literatura de Item ou *Job*. (BLAZEWICZ et al., 2001; LEUNG, 2004).
- Item (*Job*): é o produto final de um conjunto de uma ou mais operações. Normalmente é representado pelo termo J quando se versa acerca das definições de *scheduling* e pelo subscrito j nas equações, modelos e formulações. O conjunto de itens é denotado por n (LEUNG, 2004; PINEDO, 2012);
- Máquina (*Machine*): é o recurso em que os itens são processados. É representado o conjunto de máquinas pela letra m e pelo subscrito i nas equações e demais formulações;

- Tempo de Processamento (*processing time*): é o tempo necessário para o item j ser processado na máquina i . É denotado por p_{ij} . Há casos, como no caso de problemas de programação em máquina única (*Single Machine Scheduling*) em que o subscrito i é omitido (PINEDO, 2012);
- Data de liberação (*release date*): denotada por r_j , é o momento em que o item chega ao sistema, isto é, a menor data na qual o processamento pode ser iniciado. Outros termos utilizados para a data de liberação são Data de Chegada, *ready time* ou *arrival time* (BLAZEWICZ et al., 2001; LEUNG, 2004; PINEDO, 2012);
- Data de Entrega (*due date*): é a data de conclusão do item prometida ao cliente. Quando essa data não é cumprida, uma penalidade é aplicada ao problema. É denotado por d_j (BAKER; TRIETSCH, 2009; LEUNG, 2004; PINEDO, 2012);
- Data Limite de Entrega (*deadline*): quando um item deve obrigatoriamente ser entregue até a data prometida ao cliente, isto é, não se permite atrasos, diz-se que o problema de Programação da Produção com tal característica possui um *deadline*, ou data máxima de entrega, a qual é denotada por $\overline{d_j}$ (PINEDO, 2012);
- Peso (*weight*): simbolizado por w_j , denota o grau de importância relativa de um item em relação aos demais itens do sistema (LEUNG, 2004; PINEDO, 2012);
- Interrupção (*preemption*): ocorre quando o processamento de um item pode ser interrompido em qualquer uma das máquinas do sistema, isto é, o item é retirado da máquina antes da conclusão do processamento nesta. Nos casos em que a interrupção é permitida, esta é representada na literatura de *scheduling* pela abreviatura *pmtn* (CHEN; POTTS; WOEGINGER, 1998);
- Restrições de precedência (*precedence constraints*): problemas de Programação da Produção com esse tipo de especificidade englobam casos em que alguns itens devem ser processados antes que outros iniciem seu processamento. Em sua forma generalizada, tal classe de problemas é identificada pela abreviatura *prec*. O problema de Programação da Produção é representado por um grafo acíclico direcionado, onde cada vértice representa um item, onde um item i é precedido de um item j , caso haja um arco direcionado de i para j . Quando

um item possui ao máximo um predecessor e um sucessor, as restrições de precedência desse tipo de problema são denominadas cadeias; caso o item possua no máximo um sucessor, o grupo de restrições advindo dessa variante do problema de Programação da Produção é conhecido como árvore interna (*intree*); caso haja no máximo um item predecessor, as restrições utilizadas nesse tipo de problema são denominadas de árvore externa (*outtree*) (PINEDO, 2012);

- Sem Espera (*no-wait*): problemas do tipo sem espera ocorrem quando não há tempo ocioso entre máquinas quando da produção do item, isto é, o instante de conclusão do item na primeira máquina em que este é processado é igual ao tempo de início na máquina subsequente (PINEDO, 2012). Problemas desse tipo ocorrem em indústrias de processamento contínuo como indústrias de processamento de metais (MASCIS; PACCIARELLI, 2002). Tal terminologia é denotada pela abreviatura *nwt* (CHEN; POTTS; WOEGINGER, 1998);
- Bloqueio (*blocking*): o bloqueio ocorre em ambientes produtivos nos quais existem limites para o estoque entre estações de trabalho. Tais estoques intermediários são denominados *buffers*. Quando esses *buffers* estão repletos de itens, o bloqueio se dá pela não liberação dos itens processados por parte da estação de trabalho predecessora desse *buffer*, caso esses itens fossem destinados a esse estoque intermediário já completo. Na literatura de *scheduling*, o bloqueio recebe a notação *block* nos modelos de Programação da Produção com essa característica (PINEDO, 2012; ARTIGUES; ROUBELLAT, 2008; BAKER; TRIESTCH, 2009);
- Recirculação (*recirculation*): é a possibilidade de um item ser processado mais de uma vez pela mesma estação de trabalho. Quando tal característica é apresentada nos modelos de Programação da Produção, é denotada por *rcrc* (PINEDO, 2012);
- Quebra (*breakdown*): no estudo do *scheduling*, o período de indisponibilidade de uma máquina é conhecido como quebra. Representado nos modelos pela abreviatura *brkdown* (PINEDO, 2012), esse tipo de condição pode ter caráter determinístico, quando se sabe quando e por quanto tempo a máquina estará indisponível, ou estocástico, quando se trabalha com distribuições de

probabilidade de falha da máquina e não se conhece anteriormente à falha os instantes exatos onde ela pode ocorrer;

- Tempo de preparação (*setup*): é o tempo de preparação de uma máquina para torná-la apta ao processamento de determinado item. Podem ser dependentes ou independentes da sequência em que o processamento dos itens pelas máquinas ocorre. Quando o *setup* é independente da sequência, inclui-se este no tempo de processamento do item (ABDELMAGUID, 2015); quando o tempo de preparação da máquina para o próximo item a ser processado depende do item anteriormente processado por ela, verifica-se a ocorrência de um *setup* dependente da sequência (BAKER; TRIESTCH, 2009). É denotado em modelos de Programação da Produção pela expressão $STsd$ (ALLAHVERDI et al., 2008);
- Deterioração (*deterioration*): A deterioração é um evento que ocorre em modelos de Programação da Produção em que a ordem que o item ocupa no sequenciamento importa, posto que à luz dessa ocorrência, quanto mais tarde um item tem seu processamento iniciado, maior é o tempo de processamento dele (DOLGUI; GORDON; STRUSEVICH, 2012);
- *Off-line*: ambientes fabris *off-line* são aqueles em que o responsável pela Programação da Produção dispõe, *à priori*, de todas as informações correlatas à característica dos itens, como datas de entrega e tempos de processamento (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998);
- *Online*: a linha produtiva é considerada *online* quando as informações concernentes às características dos itens são conhecidas ao longo da atividade de Programação da Produção e não *à priori* (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998);
- Estático: caracterização do ambiente fabril quando o conjunto de itens a serem nele processados não se altera ao longo da Programação da Produção (BAKER; TRIESTCH, 2009);
- Dinâmico: caracterização da configuração de linha em que o grupo de itens processados se altera ao longo da atividade de *scheduling*, isto é, ocorre a

chegada ou retirada de novos itens após iniciada a Programação da Produção (BAKER; TRIETSCH, 2009)

- Programações Sem Atraso (*Non-Delay Schedules*): ocorrem quando nenhuma máquina, ao longo de todo período de programação, está ociosa enquanto uma operação espera para ser processada (PINEDO, 2012);
- Programações Ativas (*Active Schedules*): uma programação é dita ativa quando não é possível obter outra programação factível, por meio de mudanças na ordem de processamento, com pelo menos, uma operação sendo concluída com adiantamento e sem operações terminando com atraso (PINEDO, 2012). Cada item ou tarefa não pode ser deslocada para esquerda (antecipada), isto é, não pode ser adiantada sem que torne a programação obtida infactível (TIMKOVSKY, 2004);
- Programações Semiativas (*Semi-Active Schedule*): uma programação é dita semiativa quando nenhuma operação pode ser concluída de modo antecipado sem que haja mudanças na ordem de processamento de qualquer uma das máquinas (PINEDO, 2012);
- Programações Densas (*Dense Schedules*): uma programação é dita densa quando existe ociosidade em uma máquina somente caso inexista qualquer item a ser processado naquela máquina (CHEN; POTTS; WOEGINGER, 1998);
- *Makespan*: é o principal objetivo trabalhado nos problemas de Programação da Produção da literatura. É o instante de conclusão do último item a deixar o ambiente produtivo. Nas formulações dos problemas de *scheduling* é denotado por C_{max} (PINEDO, 2012);
- Atraso (*tardiness*): ocorre quando o instante de conclusão do processamento de determinado item é após a data de entrega prometida ao cliente. Normalmente, o atraso é representado nas formulações por T_j , sendo o subscrito j associado ao item processado (BAKER; TRIETSCH, 2009). Outra possibilidade de notação para o atraso encontrada na literatura é aquela expressa por D_j (CHEN; POTTS; WOEGINGER, 1998);

- Adiantamento (*earliness*): quando o instante de término do processamento de um item ocorre antes da data de entrega, tem-se o adiantamento, simbolizado nas formulações de problemas de *scheduling* por E_j , em que o subscrito j representa o item processado (CHEN; POTTS; WOEGINGER, 1998);
- Desvio de Pontualidade (*lateness*): É a diferença de tempo entre o instante de conclusão da tarefa e a data de entrega. Se o *lateness* assumir valores negativos é porque ocorreu um adiantamento; se assumir valores positivos é porque o item processado foi entregue em atraso; caso o *lateness* seja nulo, o instante de conclusão do item e a data de entrega prometida coincidem. O desvio de pontualidade é denotado por L_j (BAKER; TRIETSCH, 2009);
- Tempo de Fluxo (*flowtime*): é o tempo transcorrido entre a data de liberação do item até o instante de conclusão dele no sistema. É denotado por F_j (BLAZEWICZ, 2001);

Em relação a esses quatro últimos termos elencados nessa seção, convém destacar que para problemas de Programação da Produção que contenham mais de uma estação de trabalho, é necessário acrescentar o subscrito i , referente à máquina em que o item está sendo processado, às notações supracitadas.

2.3 PRESSUPOSTOS CLÁSSICOS

Com o propósito de tornar viável a aplicação dos conceitos da teoria de Programação da Produção, normalmente são utilizadas determinadas condições que devem ser atendidas, a fim de facilitar a modelagem e resolução dos problemas de *scheduling*. Estas condições são conhecidas como pressupostos restritivos (RINNOOY KAN, 1976). Estes são divididos em três categorias:

1. Relacionadas aos itens a serem processados;
2. À máquina;
3. À máquina e aos itens de maneira conjunta.

Relativos à primeira, tem-se:

- Pressuposto de quantidade: o conjunto de itens a ser processados pelo ambiente produtivo deve ser conhecido *à priori* e fixado;
- Todos estão disponíveis no mesmo instante, ou seja, possuem a mesma data de liberação;
- Pressuposto de continuidade: todos estão continuamente disponíveis;
- Pressuposto de Importância: todos os itens são igualmente importantes, isto é, em consonância com os pressupostos clássicos, não há diferenciação entre os itens ou ponderação por pesos deles;
- Cada um deles é processado por uma máquina de cada vez;

No que concerne aos pressupostos referentes à máquina, se pode citar:

- O conjunto de máquinas responsável pelo processamento dos itens deve ser conhecido *à priori* e fixado (pressuposto de quantidade);
- Pressuposto de importância: todas são igualmente importantes, sem que haja, portanto, ponderações ou valores relativos a elas;
- Pressuposto de exclusividade: cada estação de trabalho deve processar um item de cada vez;
- Todas devem estar continuamente disponíveis, ou seja, não há períodos em que elas estão inaptas ao uso (quebra)(pressuposto de continuidade);
- O tempo de preparação (*setup*) deve estar incluído no tempo de processamento de item. Além disso, ele deve ser independente da sequência;

São condições clássicas utilizadas nos problemas de Programação da Produção e correlatas de modo conjunto aos itens e máquinas:

- Todos os tempos de processamento são fixos e independentes da sequência;
- Todo processamento de um item, uma vez iniciado, deve ser concluído sem interrupção (*preemption*);

Atualmente, em modelos mais complexos, muitos desses pressupostos clássicos não são utilizados, a fim de tornar os problemas propostos mais próximos à realidade encontrada nas indústrias, como por exemplo, a possibilidade da existência de momentos de indisponibilidade das máquinas, verificada no trabalho de Almeder e Hartl (2013).

2.4 NOTAÇÃO DE GRAHAM

Com o intuito de classificar os problemas de *scheduling*, Graham et al. (1979) propuseram uma categorização destes, representando-os em uma notação de três campos. Esses campos são simbolizados pelas letras gregas α , β e γ , em que α representa o ambiente fabril; β as características do item; e γ corresponde ao critério de otimalidade.

No que tange ao campo representado pela letra α , se pode apresentar as seguintes notações: 1, para a máquina única; Pm , para máquinas paralelas e idênticas; Qm para máquinas paralelas uniformes; Rm para máquinas paralelas não-relacionadas; Fm para *Flow Shop*; Jm o *Job Shop*; Om para o *Open Shop*.

Em relação ao campo β , faz-se necessário ponderar algumas considerações prévias à descrição deste. Nesse campo, ao contrário dos demais componentes da notação de Graham, pode ocorrer deste ficar vazio, sem qualquer notação. Quando isso ocorre, o modelo de Programação da Produção estudado está em consonância com todos os pressupostos clássicos. Outra característica relevante de β é a possibilidade de se trabalhar com mais de uma característica do item, como a possibilidade de se combinar um modelo que permita interrupção (*preemption*) e que tenha *setups* dependentes da sequência. São exemplos de notações presentes nesse campo: $pmtn$, quando o modelo de *scheduling* estudado permite interrupção; nwt , quando o ambiente estudado não permite que o item tenha intervalos ociosos em seu processamento; $prec$, quando existem restrições de precedência; $\overline{d_j}$, quando o modelo prevê uma data máxima para a entrega do item (*deadline*); r_j , quando o item (tirar o tempo futuro) deve ter seu processamento principiado apenas na data de liberação. Quando essa notação não aparece no campo β , o processamento do item

pode começar a qualquer momento; *brkdown*, quando o modelo de *scheduling* não prevê a contínua disponibilidade da estação de trabalho, permitindo quebras; entre outros.

Por fim, γ , assim como β , pode ter mais de uma entrada, nos casos em que há mais de um critério de otimalidade sendo utilizado no modelo de *scheduling* estudado. São exemplos de critérios de otimalidade utilizados na literatura: o *makespan*, denotado por C_{\max} ; *Lateness* máximo, representado nos modelos como L_{\max} ; atraso total ponderado, simbolizado pela expressão $\sum w_j T_j$; número de tarefas atrasadas, denotado por $\sum U_j$; entre outros.

2.5 PROPOSTA TAXONÔMICA

A proposta do presente trabalho é complementar a notação de Graham. Nesse sentido, acrescentou-se, aos campos α, β e γ desta, três campos, concernentes ao modo de chegada dos itens, ao tipo de método e ao método resolutivo propriamente dito.

Portanto, a notação proposta é organizada do seguinte modo: α , referente ao ambiente fabril; β , tangente às características dos itens; γ , alusivo aos critérios de otimalidade; δ , respectivo ao modo de chegada dos itens (estático, dinâmico, estático/dinâmico); η , concernente ao tipo de método resolutivo e ι , tangente ao método resolutivo propriamente dito.

Em relação ao campo η , há um subscrito acompanhando-o, posto que há mais de um tipo de método resolutivo utilizado. Ademais, em relação ao método resolutivo, por haver um elevado número de entradas possíveis, esta deverá ser mencionada na hora da classificação. Assim a notação proposta é resumida como se segue: $\alpha / \beta / \gamma / \delta / \eta / \iota$.

2.6 TRABALHOS CORRELATOS

No último triênio, o estudo do *scheduling* tem sido um dos mais profícuos em artigos e publicações na área da Pesquisa Operacional. Uma pesquisa na *Web of Science*, com '*scheduling*' presente no título e '*machine*' como tópico, apresenta 460 artigos publicados em periódicos em 2013, 482 em 2014 e 543 em 2015.

Com a necessidade de agrupar e sistematizar o conhecimento produzido na área de Programação da Produção, diversos trabalhos se propõem a fazer um resgate do que de mais relevante foi elaborado em termos acadêmicos em relação a esse tema. A esse tipo de estudo dá-se o nome de revisão da literatura

No que diz respeito à estrutura utilizada nas revisões de *scheduling*, tem-se normalmente o estudo aprofundado de um determinado tópico, seja:

- O ambiente produtivo, como em Annand e Paneerselvam (2015), que se dedicaram ao estudo do *Open Shop*, Cheng e Sin (1990), que realizaram um estudo do estado da arte acerca de problemas de Programação da Produção em máquinas paralelas, Mellor (1966), dedicado ao estudo do *Job Shop*, entre outros;
- A característica do item, como em Goncharov e Sevastyanov (2009), os quais realizaram um estudo acerca de problemas de *scheduling* que tratam de restrições de não-ociosidade das máquinas (*no-idle constraints*) no ambiente *flow shop*, Sen e Gupta (1984), os quais trabalharam sobre o papel que considerações acerca das datas de entrega dos itens tem nos critérios de otimalidade estudados, Allahverdi et al. (2008), em que se discorre no que concerne à temática do *setup* nos problemas de Programação da Produção, Blazewicz et al. (1983), que fizeram uma classificação dos problemas de *scheduling* sujeitos às restrições de recursos, entre outros;
- Ao critério de otimalidade empregado, como em Reza Hejazi e Saghafian (2005), que estudaram a literatura de *scheduling* dedicada ao estudo da minimização do *makespan*; Li e Yang (2009), que estudaram a minimização do tempo de conclusão dos itens, seja o tempo total ou médio, seja atribuindo pesos ou importância aos itens, seja trabalhando problemas de Programação da Produção não ponderados; Koulamas (1994), que pesquisou os trabalhos que se detiveram

ao estudo do atraso total como critério de otimalidade nos problemas de *scheduling*, entre outros.

Além das estruturas supracitadas, há dois formatos que recebem maior atenção por parte deste estudo, por ter maior similaridade com o que se propõe a fazer nesse trabalho: os *reviews* dedicados a estudar os métodos resolutivos empregados na resolução de problemas de *scheduling* e as revisões empregadas no sentido de generalização do estudo, isto é, revisões extensas que apresentam diversos tópicos da Programação da Produção, sem que haja restrição a uma característica do item ou critério de otimalidade específico.

Em relação ao primeiro, Lin, Goodman e Punch III (1997) fizeram um resgate de trabalhos que investigaram o uso de algoritmos genéticos na Programação da Produção de ambientes *Job Shop*. Tavares Neto e Godinho Filho (2013) elaboraram uma revisão de literatura acerca de estudos que utilizaram a Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*) em problemas de *scheduling*. Maccarthy e Liu (1993) elaboraram um *review* dedicado ao estudo dos métodos heurísticos utilizados na resolução de problemas de Programação da Produção, entre outros.

No que tange às revisões que fizeram um estudo generalizado dos problemas de Programação da Produção, destacam-se aqui dois dos mais importantes estudos de *scheduling* encontrados na literatura:

O *review* de Graham et al. (1979), responsável pela criação do sistema de classificação de problemas de Programação da Produção mais difundido e aplicado na literatura correlata a essa temática, a notação de Graham; e

O artigo de Graves (1981), que fez um extenso trabalho de busca de artigos correlatos aos mais diversos tópicos concernentes ao *scheduling*, tratando não apenas dos ambientes fabris, mas também dos métodos resolutivos empregados nesses problemas.

Outro trabalho relevante respectivo a essa estrutura de revisão da literatura é o de Potts e Strusevich (2009), que fez um resgate do que mais relevante foi produzido nos últimos cinquenta anos em relação à Programação de Produção. Ativeram-se ao que tange aos marcos históricos correlatos ao *scheduling*, sejam artigos seminais,

eventos que contribuíram para a difusão do estudo nessa área, principais técnicas resolutivas utilizadas nesse campo, além de considerações acerca da complexidade computacional dos problemas de Programação da Produção. Este artigo difere-se do trabalho proposto na medida em que este faz uma revisão histórica, sem critérios definidos, enquanto nesta dissertação os trabalhos são categorizados sob o prisma de um conjunto objetivo de critérios.

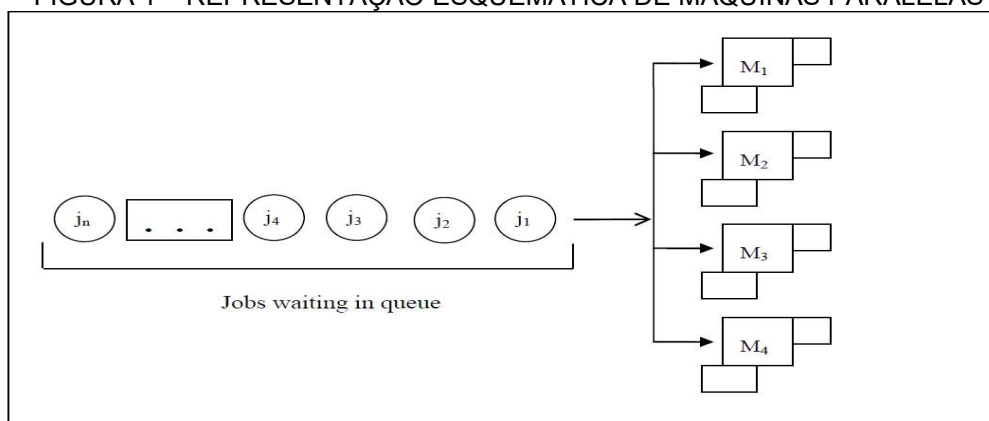
2.7 AMBIENTES FABRIS

Nesta seção tratou-se dos ambientes fabris, abordando-se os tipos e características principais de cada um deles, à exceção do *Single Machine*.

2.7.1 Máquinas Paralelas

Um conjunto de máquinas dispostas em paralelo é importante tanto do ponto de vista teórico quanto da aplicabilidade prática. Sob a ótica do primeiro, pode ser entendido como uma generalização do *Single Machine Scheduling* (PINEDO, 2012); sob a perspectiva do segundo, verifica-se a existência de paralelismo em relação aos recursos na prática, como em linhas produtivas, como no caso de uma fábrica de carvão ativado, retratada no trabalho de Hegde et al. (1998). A Figura 1 apresenta esquematicamente esse ambiente.

FIGURA 1 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE MÁQUINAS PARALELAS



FONTE: Adaptado de ALHARKAN

O trabalho de McNaughton (1959) é tido como o estudo seminal no que concerne ao estudo da Programação da Produção em máquinas paralelas. Nesse estudo, o autor tratou prioritariamente de máquinas paralelas idênticas e com *deadlines* de entrega para os itens.

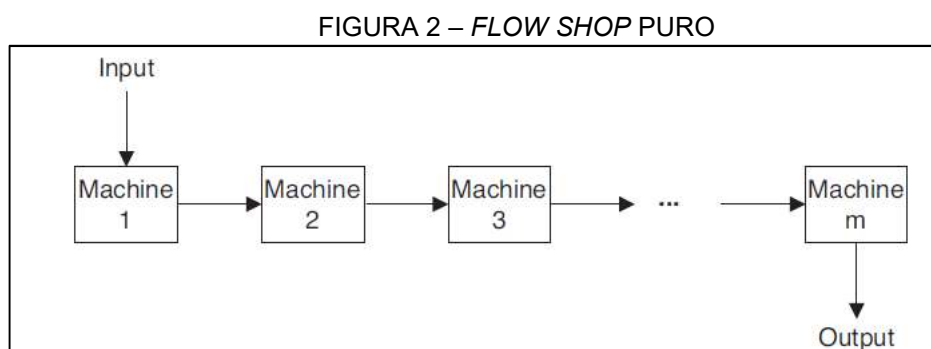
De acordo com a notação de Graham, há três tipos de máquinas paralelas, quais sejam:

- Idênticas (P_m): nesse tipo de máquinas paralelas o tempo de processamento de um item é o mesmo para todas as m máquinas (ESQUIROL; LOPEZ, 2008) e independe da máquina em que será processado (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998). Quando se omite o subscrito m , tem-se uma definição arbitrária do número de máquinas (LEUNG, 2004). São exemplos de trabalhos que contemplaram o estudo de máquinas paralelas idênticas os artigos de Azizoglu (2003), que abordou a preempção e a existência de *deadlines* nesse contexto; Lin e Liao (2004), cujo artigo tratou da minimização do *makespan* para problemas dessa natureza; Conway et al. (1967), que trabalhou a minimização do tempo de conclusão total; e Horn (1974), que usou uma abordagem de fluxo em redes para criar um teste que verifica a existência de sequências factíveis nas quais cada item deve ser processado dentro do intervalo entre sua data de liberação e sua data de entrega, entre outros;
- Uniformes (Q_m): nesse caso as máquinas operam em diferentes velocidades de processamento (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998) uniformemente variadas por um fator (ESQUIROL; LOPEZ, 2008). O tempo de processamento do item j na máquina i (p_{ij}) é igual à razão entre o tempo de processamento padrão do item (geralmente mensurado na máquina mais lenta (p_j) e um fator de velocidade de processamento da máquina i (b_i), isto é, $p_{ij} = \frac{p_j}{b_i}$ (BLAZEWICZ, 2001). São exemplos de trabalhos que fizeram o estudo de máquinas paralelas uniformes os artigos de Lushchakova (2012), que trata de problemas com possibilidade de interrupção, com o objetivo de minimizar o atraso total; Yeh, Chuang e Lee (2015), cujo artigo abordou a temática da restrição dos recursos, ou seja, o consumo de determinado insumo não pode exceder um certo nível; entre outros.

- Não relacionadas (R_m): nas máquinas não relacionadas, o tempo de processamento de um item depende da máquina em que este foi alocado (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998). Portanto, nesse caso, o tempo de processamento é completamente variável entre as diferentes máquinas (ESQUIROL; LOPEZ, 2008). Esse ambiente é descrito como uma generalização do modelo de máquinas paralelas uniformes (PINEDO, 2012). São trabalhos que versaram acerca das máquinas paralelas não relacionadas o artigo de T'kindt, Billaut e Proust (2001), que estudaram as máquinas paralelas não relacionadas em uma indústria de garrafas de vidro, com objetivo de minimizar as diferenças nas cargas de trabalho das máquinas e de maximizar a margem de contribuição por produto; Liaw et al. (2003), cujo estudo trabalhou com máquinas paralelas não relacionadas com o objetivo de minimizar o atraso ponderado total; entre outros.

2.7.2 Flow Shop

Em geral, nos processos manufatureiros, para que se possa produzir um item são necessárias uma série de operações. Quando essas operações são realizadas seguindo uma mesma rota de processamento, da primeira à j -ésima máquina, tem-se o *Flow Shop* puro (PINEDO, 2012). Esse ambiente é considerado um tipo especial de *Job Shop*, cuja descrição será feita na próxima subseção. A Figura 2 traz a representação de um *Flow Shop* puro.



FONTE: Adaptado de BAKER; TRIETSCH (2009).

O estudo do *Flow Shop* tem como trabalho seminal o artigo de Johnson (1954), tido não apenas como o trabalho introdutório acerca dessa temática, mas também como o estudo que evidenciou a importância da Programação da Produção dentro da Pesquisa Operacional (CHEN; POTTS; STRUSEVICH, 2009). Nesse estudo, o autor

traz como principal contribuição ao *scheduling* um procedimento resolutivo que obtém o valor ótimo do *makespan*, quando da resolução de problemas de *Flow Shop* com duas máquinas, conhecido como Algoritmo de Johnson.

Esse ambiente possui duas características que o particulariza face aos demais ambientes fabris. Uma dessas características é o arranjo físico das estações de trabalho em linha (PINEDO, 2012). A outra característica distintiva do *Flow Shop* é o fluxo unidirecional, representado pela mesma ordem de processamento de todos os itens pelas estações de trabalho (ESQUIROL; LOPEZ, 2008).

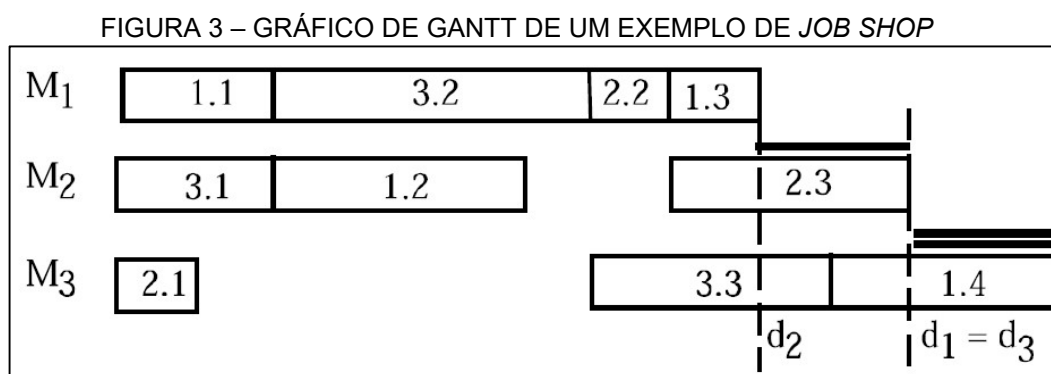
Em relação aos tipos de *Flow Shop* encontrados na literatura, os mais estudados são:

- *Flow Shop* Permutacional: é o tipo mais estudado de *Flow Shop* encontrado na literatura. Consiste em uma simplificação do *Flow Shop* puro supracitado, pois não apenas a rota de processamento dos itens pelas máquinas se mantém, mas a sequência pela qual os itens passam por cada máquina é a mesma (BLAZEWICZ, 2001). São exemplos de trabalhos que tratam do *Flow Shop* permutacional o artigo de Osman e Potts (1989), que utilizou a meta-heurística *Simulated Annealing* para a resolução de problemas desse tipo; Rifai, Nguyen e Dawal (2016), cujo trabalho contemplou a possibilidade de reentrada de itens, isto é, os itens a serem produzidos, diferentemente do que é apregoado pelas diretrizes clássicas do estudo do *scheduling* outrora mencionadas, podem passar mais de uma vez pelas estações de trabalho; entre outros;
- *Flow Shop* Flexível: também conhecido na literatura como *flow shop* híbrido ou *Flow shop* com múltiplas máquinas, consiste em uma configuração em que, em um ou mais estágios da linha de produção, há um conjunto de m máquinas paralelas nesse ou nesses estágios (PINEDO, 2012). São trabalhos correlatos a essa temática o artigo de Kim, Kang e Lee (1997), que versa sobre o *Flow Shop* com dois estágios e, em cada estágio, um conjunto de máquinas paralelas idênticas; Low (2005), que tratou do *Flow Shop* combinado com máquinas paralelas não relacionadas, utilizando na resolução desse problema o *Simulated Annealing*, entre outros;

- *Flow Shop* com bloqueio: nesse caso, existe um limite de capacidade no estoque intermediário existente entre duas máquinas consecutivas. Quando esse estoque intermediário está repleto, o item cujo processamento foi finalizado na máquina predecessora a esse estoque permanece na máquina até que exista a possibilidade desse item ser alocado a esse estoque intermediário (BAKER; TRIETSCH, 2009). São exemplos de estudos concernentes a esse assunto o artigo de Ribas, Companys e Tort-Martorell (2015), que tratou da resolução do problema do *Flow Shop* com bloqueio utilizando o Algoritmo de Colônia de Abelhas, com o propósito de minimizar o tempo de fluxo total; Abdollahpour e Rezaeian (2015), cujo objeto de estudo foi o *Flow Shop* com bloqueio com o propósito de minimizar o *makespan*, utilizando-se de três meta-heurísticas para a resolução de tal problema; entre outros.

2.7.3 Job Shop

O *Job Shop* é um ambiente fabril caracterizado por apresentar rotas de processamento fixas, mas não necessariamente as mesmas para todos os itens, ou seja, o fluxo dos itens a serem processados pelas máquinas é multidirecional (ESQUIROL; LOPEZ, 2008; PINEDO, 2012). A Figura 3 traz o gráfico de Gantt de um *Job Shop*.



FONTE: Adaptado de PORTMANN; VIGNIER (2008).

Na figura anterior, apresenta-se o roteiro de processamento de cada item da seguinte forma: as barras horizontais representam a duração de cada tarefa ou operação, enquanto o número que se encontra no interior de cada uma das barras apresenta, à esquerda do ponto, a identificação do item processado, e ao lado direito

do ponto, tem-se a posição da operação desse item do sequenciamento. Assim, por exemplo, quando na figura está apresentado 3.1 significa primeira operação do item 3.

Na literatura de *scheduling*, encontram-se estudos acerca do *Job Shop* datados de 1916, com os trabalhos de Gantt. No entanto, os artigos de Akers e Friedman (1955) e de Jackson (1956), são considerados, de fato, os trabalhos introdutórios na temática da Programação da Produção em *Job Shop*. No estudo de Akers e Friedman, considerou-se a possibilidade de recirculação, isto é, a possibilidade de um item visitar uma ou mais máquinas. O trabalho de Jackson estende os resultados encontrados por Johnson (1954) para o problema do *Job Shop* com duas máquinas, utilizando um algoritmo que encontra o melhor *makespan* para o sequenciamento.

Em relação aos tipos de *Job Shop* mais estudados na literatura, tem-se:

- *Job Shop* Flexível: de modo análogo ao que ocorre com o *flow shop* flexível, no *Job Shop* flexível um ou mais estágios produtivos é composto por um conjunto de máquinas paralelas. São trabalhos correlatos a essa temática: O artigo de Mati e Xie (2004), que trabalhou a temática da complexidade computacional do *Job Shop* combinado com máquinas paralelas não-relacionadas capazes de realizar mais de uma tarefa (*multipurpose machines*); Chen et al. (2012), cujo estudo se deteve à análise do *Job Shop* combinado com máquinas paralelas idênticas, com o propósito de atender aos objetivos de minimizar o *makespan*, o atraso total e a ociosidade total das máquinas; entre outros.
- *Job Shop* com bloqueio: o conceito do *Job Shop* com bloqueio é análogo àquele descrito quando do estudo do *Flow Shop* com bloqueio na subseção anterior. Em relação a essa temática, o trabalho mais relevante é o de Mascis e Pacciarelli (2002), que apresenta diversos tipos de bloqueio, bem como aborda a complexidade computacional de tal problema, avaliando diversos procedimentos resolutivos, como o *Branch and Bound*.

2.7.4 *Open Shop*

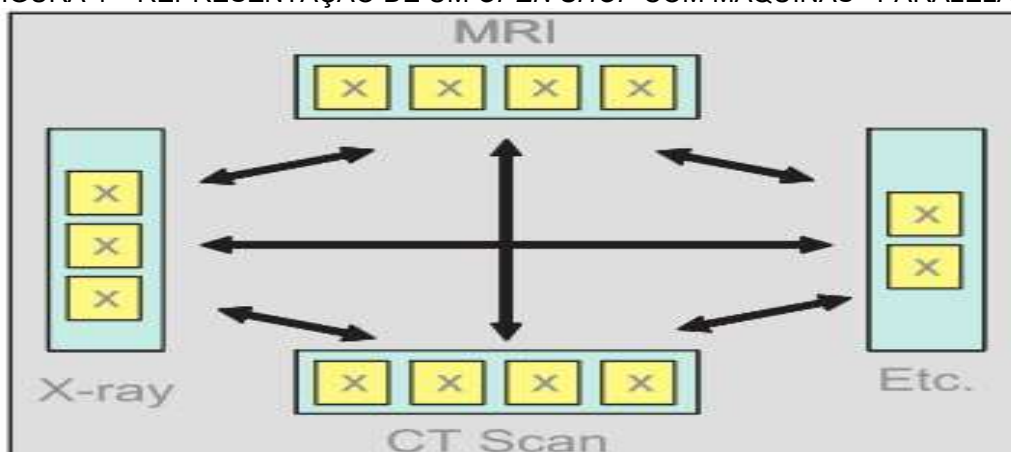
O *Open shop* é o ambiente produtivo em que não há restrições respectivas à rota de processamento de cada item ao longo do processo de produção (PINEDO,

2012). Nesse caso, a construção desta é realizada ao longo da produção dos itens e, pode diferir entre eles, sendo parte do processo decisório relativo ao sequenciamento (CHEN; POTTS; WOEGGINGER, 1998).

O trabalho seminal concernente a essa temática é atribuído a Gonzalez (colocar melhor descrição das figuras e Sahni (1976), que trata de problemas dessa natureza com considerações acerca da complexidade computacional. Este trata tanto dos casos em que existe a possibilidade da interrupção do processamento dos itens (*preemption*), como dos casos em que a interrupção não faz parte do escopo do problema. Os autores tinham como objetivo desse estudo a minimização do tempo de conclusão do processamento e, para tal intento, desenvolveram algoritmos tanto para os casos preemptivos como para os casos não preemptivos. A Figura 4 traz um exemplo de *Open Shop* com máquinas paralelas. Trata-se de um estudo de caso realizado por Matta (2009), em um centro de exames laboratoriais voltados ao tratamento do câncer.

Dentre os exemplos encontrados no cotidiano que podem ser considerados como modelos de *Open Shop* estão uma oficina mecânica, centros de controle de qualidade, tarefas escolares, entre outros.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO DE UM OPEN SHOP COM MÁQUINAS PARALELAS



FONTE: Adaptado de MATTÁ (2009).

3 MODELOS MATEMÁTICOS DE *SHOP SCHEDULING*

Neste capítulo apresentam-se os modelos matemáticos referentes às características dos itens mais frequentes encontradas nos estudos de *Shop Scheduling*, como por exemplo, interrupção, sem espera, entre outros.

3.1 *FLOW SHOP*

Nesta seção são apresentados cinco modelos matemáticos de *Flow Shop*, em que se retrata as principais características abordadas na literatura respectiva a esse ambiente fabril, bem como apresenta modelos tanto puros, quanto hibridizados.

3.1.1 *Flow Shop* sem espera

Conforme supracitado, o *Flow Shop* sem espera é caracterizado pela inexistência de tempo ocioso entre operações consecutivas de um item. O modelo matemático utilizado para representar tal classe de problemas é aquele proposto por Samarghandi (2015), que não apenas traz essa característica do item, bem como faz ponderações acerca de outra característica importante tratada na literatura, que é a questão das restrições de data de entrega.

$$\text{Min } C_{\max} \quad (3.1.1)$$

$$C_{\max} \geq S_{O_{im}} + p_{im}; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.2)$$

$$S_{O_{k1}} + M(1 - x_{ik}) \geq S_{O_{i1}} + p_{i1}; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.3)$$

$$\bullet \quad S_{O_{i[j]}} = S_{O_{ij}} + p_{ij}; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m - 1 \quad (3.1.4)$$

$$\bullet \quad S_{O_{im}} + p_{im} \leq d_i; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.5)$$

$$\bullet \quad \sum_{i=1}^n x_{ij} \leq 1; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.6)$$

- $$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.7)$$

- $$x_{ij} + x_{ji} \leq 1; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.8)$$

- $$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} = n - 1 \quad (3.1.9)$$

- $$S_{O_{ij}} \geq 0; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.1.10)$$

- $$x_{ij} \in \{0, 1\}; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.11)$$

Neste modelo, o objetivo é a minimização do *makespan* e x_{ij} é uma variável binária que é definida com se segue:

- $$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se item } j \text{ é sucessor imediato de } i \text{ na sequência} \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad (3.1.12)$$

A restrição (3.1.2) define que o *makespan* é igual ao tempo de conclusão da última operação do último item em conjunto com a eq. 3.1.1. A restrição (3.1.3) assegura que as operações não sofrem *overlap*, isto é, até que toda a operação do item esteja concluída em uma estação de trabalho, este não pode prosseguir à máquina seguinte. Em (3.1.4) apresenta-se a restrição que caracteriza o *Flow Shop* sem espera. A restrição (3.1.5) traz a consideração acerca da data de entrega, em que a última operação de cada item deve ser realizada antes da data de entrega a ela associada. As restrições (3.1.6) até (3.1.9) garantem que cada item aparece de forma única na sequência. Por fim, as restrições (3.1.10) e (3.1.11) são de domínio das variáveis.

3.1.2 *Flow Shop* Permutacional

No *Flow Shop* Permutacional a sequência pela qual os itens passam por cada máquina é a mesma. Por se tratar de uma simplificação que diminui consideravelmente o espaço de soluções viáveis, é a variação do problema clássico mais comumente encontrada na literatura. No artigo de Tseng, Stafford e Gupta (2004)

faz-se uma comparação entre quatro modelos de *Flow Shop* Permutacional, quais sejam: Modelo de Wagner, Modelo de Wilson, Modelo de Manne e Modelo de Liao-You.

À priori, os subscritos e as variáveis dos modelos são apresentados, bem como uma breve explanação deles. São subscritos dos modelos: r para as máquinas ($1 \leq r \leq M$); i e k para os itens ($1 \leq i, k \leq N$); e j para a posição na sequência ($1 \leq j \leq N$) onde os parâmetros M e N representam o número de máquinas e itens, respectivamente. $T = \{T_{rj}\}$ é a matriz $M \times N$ dos tempos de processamento, com T_{ri} = tempo de processamento do item i na máquina r . As variáveis são as seguintes:

B_{rj} - Instante de início do item na posição j na máquina r ;

C_{ri} - Instante de término do item i na máquina r ;

D_{ik} - 1, se o item i está programado em qualquer instante antes do item k ; 0, caso contrário; $i < k$;

E_{rj} - Instante de conclusão do item na posição j na máquina r ;

S_{ri} - Instante de início do item i na máquina r ;

X_{rj} - Tempo ocioso na máquina r antes do início do item na posição j ;

Y_{rj} - Tempo ocioso do item na posição j depois do término do processamento na máquina r ;

Z_{ij} - 1, se o item i está designado na posição j , 0, caso contrário;

C_{\max} - *Makespan*

Finda a breve descrição das variáveis, tem-se a apresentação dos modelos, que são todos classificados como Programação Linear Inteira Mista.

3.1.2.1 Modelo de Wagner

- $$\text{Min } C_{\max} = C_{MN} \quad (3.1.13)$$

- Sujeito a
$$\sum_{j=1}^N Z_{ij} = 1; \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3.1.14)$$

- $$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N T_{ri} Z_{i,j+1} - \sum_{i=1}^N T_{r+1,i} Z_{ij} + X_{r,j+1} \\ & - X_{r+1,j+1} + Y_{r,j+1} - Y_{rj} = 0; \end{aligned} \quad (3.1.15)$$

$$(1 \leq r \leq M-1; 1 \leq j \leq N-1)$$

- $$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N T_{ri} Z_{i1} + X_{r1} - X_{r+1,1} + Y_{r1} = 0; \end{aligned} \quad (3.1.16)$$

$$(1 \leq r \leq M-1)$$

- $$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N T_{ri} Z_{i1} + X_{r1} - X_{r+1,1} + Y_{r1} = 0; \end{aligned} \quad (3.1.17)$$

$$(1 \leq r \leq M-1)$$

- $$C_{MN} = \sum_{i=1}^N T_{Mi} + \sum_{p=1}^N X_{Mp} \quad (3.1.18)$$

As restrições (3.1.14) e (3.1.15) são as clássicas de designação. Enquanto a primeira assegura que cada item seja designado a apenas uma posição na sequência, a última garante que a posição na sequência é ocupada por apenas um item. Restrições (3.1.16) e (3.1.17), referidas como restrições de adjacência de itens e conexão entre as máquinas, foram propostas por Tseng e Stafford (2001) e garantem que o item na posição j não pode iniciar seu processamento na máquina $r+1$ até que seja encerrado seu processamento na máquina r e que o item na posição $j+1$ não pode iniciar seu processamento na máquina r até que o item na posição j conclua seu processamento naquela mesma máquina. A restrição (3.1.18) calcula o *makespan* do conjunto de itens.

3.1.2.2 Modelo de Wilson

- $$\text{Min } C_{\max} = B_{MN} + \sum_{i=1}^N T_{Mi} Z_{iN} \quad (3.1.19)$$

- Sujeito a
$$\sum_{j=1}^N Z_{ij} = 1; (1 \leq i \leq N) \quad (3.1.20)$$

- $$\sum_{i=1}^N Z_{ij} = 1; (1 \leq j \leq N) \quad (3.1.21)$$

- $$B_{1j} + \sum_{i=1}^N T_{1i} Z_{ij} = B_{i,j+1}; (1 \leq j \leq N-1) \quad (3.1.22)$$

- $$B_{11} = 0 \quad (3.1.23)$$

- $$B_{r1} + \sum_{i=1}^N T_{ri} Z_{i1} = B_{r+1,j}; (1 \leq r \leq M-1) \quad (3.1.24)$$

- $$B_{rj} + \sum_{i=1}^N T_{ri} Z_{ij} \leq B_{r+1,j}; \quad (3.1.25)$$

$$(1 \leq r \leq M-1; 2 \leq j \leq N)$$

- $$B_{rj} + \sum_{i=1}^N T_{ri} Z_{ij} \leq B_{r,j+1}; \quad (3.1.26)$$

$$(2 \leq r \leq M; 1 \leq j \leq N-1)$$

As restrições (3.1.20) e (3.1.21) são as mesmas de designação encontradas no modelo de Wagner supracitado. As restrições (3.1.22), (3.1.23) e (3.1.24) asseguram a inexistência de tempo ocioso na máquina 1 e que o item 1 é processado em todas as M máquinas sem qualquer atraso. A restrição (3.1.25) garante que o início do processamento de cada item na máquina $r+1$ não ocorre antes de sua conclusão na máquina r . A restrição (3.1.26) garante que o item na posição $j+1$ na sequência não inicia seu processamento na máquina r até que o item na posição j na sequência tenha sido concluído naquela máquina.

3.1.2.3 Modelo Adaptado de Manne

O modelo original de Manne (1960) foi concebido para tratar do problema de *Job Shop* geral. Tseng and Stafford (1990) adaptaram o modelo original para problemas de *Flow Shop* Permutacional. Nessa adaptação, tem-se que P é uma constante muito grande.

- $$\text{Min } C_{\max} \quad (3.1.27)$$

- Sujeito a
$$C_{1i} \geq T_{1i}; \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3.1.28)$$

- $$C_{ri} - C_{r-1,i} \geq T_{ri}; \quad (2 \leq r \leq M; 1 \leq i \leq N) \quad (3.1.29)$$

- $$\begin{aligned} C_{ri} - C_{rk} + PD_{ik} &\geq T_{ri}; \\ (1 \leq r \leq M; 1 \leq i < k \leq N) \end{aligned} \quad (3.1.30)$$

- $$\begin{aligned} C_{ri} - C_{rk} + PD_{ik} &\leq P - T_{rk} \\ (1 \leq r \leq M; 1 \leq i < k \leq N) \end{aligned} \quad (3.1.31)$$

- $$C_{\max} \geq C_{Mi}; \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3.1.32)$$

A restrição (3.1.28) assegura que o tempo de conclusão de cada item na máquina 1 não ocorre antes da duração do tempo de processamento daquele item na máquina 1. A restrição (3.1.29) garante que o tempo de conclusão de cada item na máquina r não ocorre mais cedo que o tempo de conclusão daquele item na máquina $r-1$ mais o tempo de processamento dele na máquina r . As restrições (3.1.30) e (3.1.31) constituem o par de restrições disjuntas que garantem que o item i ou precede o item k ou sucede o item k na sequência. A restrição (3.1.32) iguala o *makespan* ao tempo máximo de conclusão de todos os itens na última máquina.

3.1.2.4 Modelo de Liao-You

Em seu trabalho, Liao e You (1992) combinaram algebricamente cada par de restrições de desigualdade dicotômicas do modelo original de Manne (1960) em uma restrição simples de igualdade igualada a uma variável de folga, q_{rik} , que corresponde à relação de precedência entre os itens i e k na máquina r .

- $$\text{Min } C_{\max} \quad (3.1.33)$$

- Sujeito a
$$S_{ri} + T_{ri} \leq S_{r+1,i}; \quad (1 \leq r \leq M-1; 1 \leq i \leq N) \quad (3.1.34)$$

- $$S_{ri} - S_{rk} + PD_{ik} - T_{rk} = q_{rik} \quad (3.1.35)$$

 $(1 \leq r \leq M; 1 \leq i < k \leq N)$

- $$P - T_{ri} - T_{rk} \geq q_{rik}; \quad (1 \leq r \leq M; 1 \leq i < k \leq N) \quad (3.1.36)$$

- $$C_{\max} \geq S_{Mi} + T_{Mi}; \quad (1 \leq i \leq N) \quad (3.1.37)$$

A restrição (3.1.34) assegura que o processamento do item i na máquina $r+1$ não inicia antes da conclusão deste na máquina r . A restrição (3.1.35) é a restrição de igualdade anteriormente mencionada. A restrição (3.1.36) limita a variável de folga q_{rik} . A restrição (3.1.37) calcula o *makespan*.

3.1.3 Flow Shop com Bloqueio

O bloqueio ocorre em ambientes que contemplam a limitação das filas de estoque intermediário, ou *buffers*, e se dá pela não liberação dos itens processados por parte da estação de trabalho predecessora desse *buffer*, caso esses itens fossem endereçados a esse estoque já repleto. No artigo de Gong, Tang e Duin (2010), os autores trabalham essa variante do *Flow Shop* por meio de uma Programação Quadrática Inteira Mista com o objetivo de minimizar a combinação linear do *makespan* e do tempo total de bloqueio.

Índices

- j - Índice de item, $j = 1, 2, \dots, n$;
- k - Índice de lote, $k = 1, 2, \dots, n$ (índices elevados podem representar lotes vazios);

Parâmetros

- λ - Fator de ponderação;
- p - Tempo de processamento do lote na máquina 1;
- p_j - Tempo de processamento do item j na máquina 2;

- t - Tempo de *setup* na máquina 2;
- c - Capacidade do lote;

Variáveis de decisão

- x_{jk} - 1 se o item j está contido no lote k ; 0, caso contrário;
- y_k - 1 se o lote k está programado para ser processado; 0, caso contrário;
- S_k - Instante de início do lote k na máquina 1;
- D_k - Instante de saída do lote k na máquina 1;
- P_k - Tempo total de processamento dos itens do lote k na máquina 2;
- b_k - Tempo de bloqueio do lote k na máquina 1;
- C_k - Instante de término do lote k na máquina 2;
- C_{\max} - *Makespan*.

Modelo Matemático

- $$\text{Minimize } \lambda C_{\max} + (1-\lambda) \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n x_{jk} b_k \quad (3.1.38)$$

- $$\text{sujeito a } \sum_{k=1}^n x_{jk} = 1; j = 1, 2, \dots, n \quad (3.1.39)$$

- $$S_1 = 0, S_k = D_{k-1}, k=2, \dots, n \quad (3.1.40)$$

- $$D_1 = p, D_k \geq C_{k-1}, k=2, \dots, n \quad (3.1.41)$$

- $$D_k \geq S_k + y_k p, k=2, \dots, n \quad (3.1.42)$$

- $$C_k = D_k + y_k t + P_k, k=1, 2, \dots, n \quad (3.1.43)$$

- $$b_k = \max\{D_k - S_k - p, 0\}, k=1,2,\dots,n \quad (3.1.44)$$

- $$P_k = \sum_{j=1}^n x_{jk} p_j, k=1,2,\dots,n \quad (3.1.45)$$

- $$y_k - y_{k+1} \geq 0, k=1,2,\dots,n-1 \quad (3.1.46)$$

- $$\sum_{j=1}^n x_{jk} \geq y_k, k=1,2,\dots,n \quad (3.1.47)$$

- $$\sum_{j=1}^n x_{jk} - cy_k \leq 0, k=1,2,\dots,n \quad (3.1.48)$$

- $$C_{\max} \geq C_k, k=1,2,\dots,n \quad (3.1.49)$$

- $$x_{jk} \in \{0,1\}. \quad \forall j,k \quad (3.1.50)$$

- $$y_k \in \{0,1\}, \quad \forall k \quad (3.1.51)$$

O conjunto de restrições (3.1.39) garante que cada item deve ser programado exatamente uma vez. As restrições (3.1.40) e (3.1.41) estipulam que o processamento de qualquer lote na máquina 1 deve iniciar imediatamente após a saída do lote anterior da máquina 1 e a saída da máquina 1 ocorre após a conclusão do lote anterior na máquina 2, respectivamente. O conjunto de restrições (3.1.42) indicam que um lote pode deixar a máquina 1 após seu processamento naquela máquina. A restrição (3.1.43) define o instante de término de cada lote na máquina 2 e a restrição (3.1.44) define o tempo de bloqueio de cada lote na máquina 1. A restrição (3.1.45) indica o tempo total de processamento de cada lote na máquina 2. A restrição (3.1.46) garante que todos os lotes vazios recebem índices altos. As restrições (3.1.47) e (3.1.48) asseguram que cada lote não vazio contém um número de itens entre 1 e c . A restrição (3.1.49) detecta o *makespan*. As restrições (3.1.50) e (3.1.51) são restrições de domínio das variáveis.

Além desse trabalho, outros artigos exploraram modelos matemáticos para o problema do *Flow Shop* com Bloqueio. Destes, se pode citar os artigos de Liang et al. (2011) e de Moslehi e Khorasanian (2013).

3.1.4 *Flow Shop* sem tempo ocioso

Problemas de *Flow Shop* sem tempo ocioso são caracterizados pela contínua utilização das máquinas, isto é, enquanto houver itens a serem processados naquela máquina, esta é ininterruptamente utilizada. O artigo de Pan e Ruiz (2014) traz em seu bojo essa variante do *Flow Shop*, com o incremento da abordagem mista para esse problema. Nessa abordagem algumas máquinas do conjunto apresentam a inexistência de tempo ocioso, enquanto outras permitem a ociosidade de suas estações de trabalho. O modelo matemático trabalhado pelos autores também contempla o caráter permutacional do sequenciamento.

Variáveis de decisão

- $X_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } j \text{ ocupa a posição } k \text{ da sequência} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$;
- $C_{i,k}$ - Tempo de conclusão do item na posição k na máquina i ;
- C_{\max} - *Makespan*.

Modelo Matemático

- $$\text{Min } C_{\max} = C_{m,n} \quad (3.1.52)$$

- $$\text{sujeito a } \sum_{k=1}^n X_{j,k} = 1, j = 1, \dots, n \quad (3.1.53)$$

- $$\sum_{j=1}^n X_{j,k} = 1, k = 1, \dots, n \quad (3.1.54)$$

- $$C_{1,k} \geq \sum_{j=1}^n X_{j,1} \cdot p_{1,j}, k = 1, \dots, n \quad (3.1.55)$$

- $$C_{i,k} \geq C_{i-1,k} + \sum_{j=1}^n X_{j,k} \cdot p_{i,j}, k = 1, \dots, n, i = 2, \dots, m \quad (3.1.56)$$

$$\bullet \left\{ \begin{array}{l} C_{i,k} = C_{i,k-1} + \sum_{j=1}^n X_{j,k} \cdot p_{i,j} \text{ se } i \in M' \\ C_{i,k} \geq C_{i,k-1} + \sum_{j=1}^n X_{j,k} \cdot p_{i,j} \text{ c.c} \end{array} \right\}, k = 2, \dots, n, i = 1, \dots, m \quad (3.1.57)$$

•

$$\bullet C_{i,k} \geq 0, k = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m \quad (3.1.58)$$

$$\bullet X_{i,k} \in \{0,1\}, k = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m \quad (3.1.59)$$

As restrições (3.1.53) e (3.1.54) asseguram que cada item ocupa exatamente uma posição na sequência e de que cada posição na sequência é ocupada por exatamente um único item. O conjunto de restrições (3.1.55) controla o tempo de conclusão do item colocado na primeira posição da sequência. O conjunto de restrições (3.1.56) força com que os tempos de conclusão na segunda e nas máquinas subsequentes sejam maiores os tempos de conclusão das tarefas anteriores nas máquinas antecessoras mais o tempo de processamento. O conjunto de restrições (3.1.57) é o diferencial do trabalho dos autores. Aqui se controla o tempo de conclusão do item em uma máquina que não permita ociosidade, de modo este seja exatamente igual ao seu tempo de processamento mais o tempo de conclusão do item na posição anterior da sequência, isto é, sem permitir tempo ocioso. Entretanto, para máquinas regulares (aquelas em que a ociosidade é permitida), é suficiente garantir que o tempo de conclusão de um item é maior ou igual àquele do item anterior mais o tempo de processamento. Por fim, as restrições (3.1.58) e (3.1.59) são correlatas à natureza e ao domínio das variáveis de decisão.

3.1.5 *Flow Shop* com *Setup* Dependente da Sequência

Ao contrário do que preconizam os pressupostos clássicos da Programação da Produção, em que o tempo de preparação é independente da sequência e pode ser incluído no tempo de processamento do item, nessa variante do *Flow Shop*, a ordem em que os itens são processados têm influência nos tempos de *setup*. O artigo de Bochtis et al. (2013) traz um modelo matemático dessa variante do *Flow Shop*, aplicando-o ao caso das operações de manuseio de biomassa. Nesse estudo o item

é definido como o campo em que se realizam as operações e o tempo de *setup* é definido como o tempo de transporte entre os campos.

Seja $F = \{1, 2, 3, \dots\}$ o conjunto de campos (índices) onde um número de tarefas sequenciadas tem de ser programadas (o número total de campos é definido como $|F|$). Seja F_0 o conjunto estendido de campos que inclui o depósito do maquinário (representado pelo índice 0), $F_0 = F \cup \{0\}$. Seja M o conjunto de diferentes tipos de máquinas, ou de modo equivalente, os diferentes tipos de tarefas que devem ser executadas. O tempo necessário para completar uma tarefa é uma função da máquina e das características do campo e consequentemente, seja $o_{ij}, i \in M, j \in F$, o tempo para a tarefa ser realizada pela máquina i no campo j . Seja t_{ijk} o tempo de transporte da máquina $i \in M$ da localização física (campo ou depósito) j para o campo k ; $j \in F_0; k \in F$. O conjunto de variáveis representam o instante de início, s_{ij} , da tarefa executada pela máquina $i \in M$ no campo $j \in F$. A variável de decisão x_{jk} é uma variável binária que assume o valor 1 se o campo k é processado imediatamente após o campo j e 0, caso contrário.

Modelo Matemático

$$\bullet \quad \text{Min } C_{\max} \quad (3.1.60)$$

$$\bullet \quad \text{sujeito a } \sum_{j \in F_0} x_{jk} = 1, k \in F_0 \quad (3.1.61)$$

$$\bullet \quad \sum_{k \in F_0} x_{jk} = 1, j \in F_0 \quad (3.1.62)$$

$$\bullet \quad s_{ij} + o_{ij} + t_{ijk} \leq s_{ij} + U_i(1 - x_{jk}), i \in M; j, k \in F \quad (3.1.63)$$

$$\bullet \quad s_{|M|j} + o_{|M|j} \leq C_{\max}, j \in F \quad (3.1.64)$$

$$\bullet \quad s_{ij} + o_{ij} \leq s_{i+1,j}, i \in M \setminus \{|M|\}, j \in F \quad (3.1.65)$$

$$\bullet \quad x_{jk} \in \{0, 1\}, j, k \in F_0, j \neq k \quad (3.1.66)$$

$$\bullet \quad s_{ij} \geq L_{ij}, \quad i \in M, \quad j \in F \quad (3.1.67)$$

As equações (3.1.61) e (3.1.62) asseguram que na sequência de campos visitados (incluindo o depósito como um campo virtual) há sempre um campo predecessor e um campo sucessor (ou no caso do depósito uma máquina deixará o depósito e retornará ao depósito a partir do último campo visitado). A equação (3.1.63) garante que se o campo j precede o campo k , então o instante de início da tarefa i no campo k não deve exceder o tempo de conclusão da mesma tarefa i no campo j mais o tempo de transporte correspondente entre os dois campos. U_i É o limite superior em que a máquina i conclui a sua operação no campo $j \in F$. A equação (3.1.64) assegura que o *makespan* é maior o igual que o tempo de conclusão de todas as tarefas em todos os campos realizadas pela última máquina. A equação (3.1.65) afirma que uma máquina não pode começar a operar em um campo se a máquina anterior não concluiu a sua tarefa naquele mesmo campo. A equação (3.1.66) trata da natureza e do domínio da variável. Por fim, a equação (3.1.67) impõe a limitação do limite superior no instante de início da operação da máquina i no campo j .

3.2 JOB SHOP

Nesta seção se apresentará cinco modelos matemáticos caracterizando os principais tipos de *job shop* encontrados na literatura, abordando principais características destes, no que concerne às variáveis e restrições componentes da modelagem.

3.2.1 Job Shop com setups separáveis e dependentes da sequência

Problemas de *Job Shop* com setups separáveis permitem que a partir do momento em que a máquina subsequente esteja livre, o tempo de preparação do item pode ser iniciado nesta, mesmo sem que este esteja finalizado na máquina anterior. O modelo matemático representativo desta classe de problemas encontrada com maior frequência na prática, se comparada àquela em que a preparação é inseparável do item, é o de Choi e Korkmaz (1997), considerado pioneiro na formalização matemática do problema com setups separáveis e dependentes da sequência.

Parâmetros

- n – número de itens no sistema;
- m – número de máquinas no sistema;
- A – conjunto de pares ordenados, $\{(j,k) | j=1,...,n, k=1,...,n, j \neq k\}$;
- σ_j – sequência de operações do item j , $\sigma_j = (\sigma_1^j, ..., \sigma_m^j)$, $j=1,...,n$;
- O_{ij} – operação correspondente do item j na máquina i , $i=1,...,m, j=1,...,n$;
- p_{ij} – tempo de processamento de O_{ij} , $i=1,...,m, j=1,...,n$;
- S_{jk}^i – tempo de preparação do item k na máquina i , O_{ik} , quando o item j na máquina i , O_{ij} , é processado imediatamente antes de O_{ik} , $i=1,...,m, j,k=1,...,n, j \neq k$;
- t_i – tempo de conclusão da última operação sequenciada na máquina i , $i=1,...,m$;
- q_j – estimativa do limite inferior do tempo restante que o item j deve permanecer no sistema, $j=1,...,n$;
- V_i – conjunto dos itens disponíveis para processamento na máquina i em, ou depois, de t_i , $i=1,...,m$;
- V – união de V_i ;
- C_{\max} – *makespan*;
- t_{ij} – tempo de conclusão da operação $O_{ij} (\equiv CT(O_{ij}))$, $i=1,...,m, j=1,...,n$.

Variável de decisão

- $$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{se o item } k \text{ é sucessor imediato do item } j \text{ na máquina } i, \\ & \text{ou equivalentemente, } O_{ik} \text{ é sucessor imediato de } O_{ij}, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases} .$$

Modelo Matemático

- $$\text{Min } C_{\max} \quad (3.2.1)$$

Sujeito a

- $$t_{\sigma_h^j} + p_{\sigma_h^j} \leq t_{\sigma_{h+1}^j}, \quad h = 1, \dots, m-1, j = 1, \dots, n; \quad (3.2.2)$$

- $$t_{\sigma_m^j} + p_{\sigma_m^j} \leq C_{\max}, \quad j = 1, \dots, n; \quad (3.2.3)$$

- $$t_{ij} + p_{ij} + S_{jk}^i x_{ijk} \leq t_{ik} + (1 - x_{ijk})M, \quad i = 1, \dots, m, j = 0, 1, \dots, n, \quad ; \quad (3.2.4)$$

$$k = 1, \dots, n, j \neq k$$

- $$\sum_{k \neq j}^n x_{ijk} = 1, \quad i = 1, \dots, m, j = 0, \dots, n; \quad (3.2.5)$$

- $$\sum_{j \neq k}^n x_{ijk} = 1, \quad i = 1, \dots, m, k = 0, \dots, n; \quad (3.2.6)$$

- $$\sum_{\substack{(j,k) \in A \\ j \in U_i; k \notin U_i}} x_{ijk} \leq |U_i| - 1, \quad 2 \leq |U_i| \leq (n+1) - 1; i = 1, \dots, m; \quad (3.2.7)$$

- $$x_{ijk} \in \{0, 1\}, t_{ij} \geq 0. \quad (3.2.8)$$

O problema abordado pelos autores visa à minimização do *makespan*. As restrições (3.2.2) e (3.2.3) impõem a sequência especificada de cada item na máquina. A restrição (3.2.4) previne que haja *overlapping* de operações nas máquinas. Com essa restrição, o item k que é sucessor imediato do item j na máquina i só começa quando tanto o processamento do item j como o tempo de preparação do item k são concluídos.

A restrição (3.2.5) escolhe exatamente um sucessor imediato do item j na máquina i . A restrição (3.2.6) escolhe exatamente um item como predecessor imediato do item k na máquina i . A restrição (3.2.7) é equivalente às restrições de eliminação de sub-rota do problema do caixeiro viajante e garante a continuidade da adjacência entre itens em cada máquina, isto é, proíbe o agrupamento parcial de itens em cada máquina.

3.2.2 Job Shop com *setup* dependente da sequência e restrições de data de entrega

Nesse tipo de problema, a restrição concernente à data de entrega tem sob o prisma prático a importância de minimizar ao máximo os atrasos, com o intuito de evitar possíveis penalidades pelo descumprimento de datas acordadas com os clientes e a insatisfação destes. O modelo matemático de Fang e Xi (1997) traz como objetivo a minimização do *makespan* e considera penalizações pela entrega em atraso dos itens. Os autores em seu trabalho também trazem à baila a temática do *Job Shop* dinâmico.

Modelo Matemático

- $$\min C = \max_{i \in S_M} L_i + \alpha \sum_{j \in S_J} \max(0, t_{cj} - t_{dj}) \quad (3.2.9)$$

Sujeito a:

- $$L_i = \sum_{k \in K_i} t_{wik} + t_{sik} + t_{pik}, \quad (i \in S_M) ; \quad (3.2.10)$$

- $$t_{ff,l} \leq t_{sj,l+1} \quad (j \in S_J, l = 1, 2, \dots, O_j - 1) . \quad (3.2.11)$$

α é a penalidade de custo por atraso por item por unidade de tempo; S_M é o conjunto de máquinas; S_J é o conjunto de itens; K_i é o conjunto de operações que a máquina i pode processar; O_j é o número de operações no item j ; L_i é o *makespan* da máquina i ; t_{wik} é o tempo ocioso da máquina i antes do processamento da operação k ; t_{sik} é o tempo de *setup* da operação k na máquina i ; t_{pik} é o tempo de processamento da operação k na máquina i ; t_{cj} é o tempo de conclusão do item

j ; t_{dj} é a data de entrega do item j ; $t_{ff,l}$ é o tempo de conclusão da operação l do item j ; e $t_{sj,l+1}$ é o tempo de liberação da operação $l+1$ do item j .

A função objetivo (3.2.9) minimiza o *makespan* e penaliza o atraso dos itens com um fator α ; a restrição (3.2.10) iguala o *makespan* da máquina i ao somatório dos tempos ocioso, de processamento e de preparação da operação k naquela máquina; e, por fim, a restrição (3.2.11) exprime a relação de precedência das tarefas.

3.2.3 Job Shop com recirculação

Problemas com recirculação são aqueles em que o item pode visitar por mais de uma vez a mesma estação de trabalho, ao contrário do que se preconiza nos pressupostos clássicos da Programação da Produção. O modelo matemático de Low (2005) além de abordar essa temática, traz em seu bojo a problemática dos tempos de preparação dependente da sequência. Além disso, outro ponto relevante a se destacar é a abordagem multiobjetivo trazida pelo autor em sua modelagem, em que se trabalha de maneira simultânea a minimização do tempo total de fluxo, a minimização do atraso total e minimização da ociosidade da máquina.

- i – índice do item, $i = 1, 2, 3, \dots, n$;
- j – índice da operação, $j = 1, 2, 3, \dots, n_i$;
- k – índice da máquina, $k = 1, 2, 3, \dots, m$;
- n_i – número de operações do item i ;
- O_{jik} – operação O_{ij} processada na máquina k ;
- U_i – conjunto de pares de operações, operações consecutivas, do item i ;
- R_k – conjunto operações que pertencem ao mesmo item i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) que são processados na mesma máquina k (operações reentrantes);

- D_k – conjunto de pares de operações que são processadas na mesma máquina k ;
- DD_i – data de entrega do item i ;
- P_{ijk} – tempo de processamento da operação O_{ij} na máquina k ;
- M – um número muito grande (uma penalidade);
- C_{\max} – *makespan* do sistema, $C_{\max} = \max \{F_i\}$;
- F_i – tempo de fluxo do item i ;
- C_k – a matriz de tempos de *setup* da máquina k ;
- A_k – conjunto de operações processadas na máquina k ;
- $|A_k|$ – número de operações processadas na máquina k ;
- a_{kp} – operação numerada p no conjunto A_k ;
- a_{k0} – operação fictícia numerada 0 no conjunto A_k ;
- H_{kpq} – tempos de *setup* de a_{kp} , se a_{kp} é processada antes de a_{kq} na máquina k ;
- JT_{jik} – instante de início do processamento da operação na máquina k ;
- ST_{jik} – instante de início do *setup* da operação O_{ij} na máquina k ;
- d_i^+ – atraso do item i , $d_i^+ = \max \{0, F_i - D_i\}$;
- d_i^- – adiantamento do item i , $d_i^- = \min \{0, D_i - F_i\}$;
- $X_{kpq} = \begin{cases} 1, & \text{se a operação } a_{kp} \text{ é processada antes de } a_{kq} \text{ na máquina } k \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$;

- $Y_{kpq} = \begin{cases} 1, & \text{se a operação } a_{kp} \text{ é processada antes de } a_{kq} \text{ na máquina } k \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$

Modelo Matemático

- $$\text{F. O. 1: } \text{Min} \sum_{i=1}^n F_i \quad (3.2.12)$$

- $$\text{F. O. 2: } \text{Min} \sum_{i=1}^n d_i^+ \quad (3.2.13)$$

- $$\text{F. O. 3: } \text{Min} \left[m \times C_{\max} - \sum_{\forall O_{ijk} \in N} (JT_{ijk} - ST_{ijk} + P_{ijk}) \right] \quad (3.2.14)$$

Sujeito a:

- $$JT_{in,k} + P_{in,k} = F_i, \quad \forall O_{in,k} \quad (3.2.15)$$

- $$D_i - F_i = d_i^- - d_i^+, \quad \forall i \quad (3.2.16)$$

- $$C_{\max} \geq F_i, \quad \forall i \quad (3.2.17)$$

- $$JT_{ijk} + P_{ijk} \leq JT_{ij'k'}, \quad \forall i, \forall (O_{ijk}, O_{ij'k'}) \in U_i \quad (3.2.18)$$

- $$JT_{ijk} + P_{ijk} \leq ST_{ij'k'}, \quad \forall k, \forall (O_{ijk}, O_{ij'k'}) \in R_k \quad (3.2.19)$$

- $$JT_{ijk} = ST_{ijk} + \sum_{a_{kp} \in A_k \cup A_{k0}} (H_{kpq} \times X_{kpq}) \quad (3.2.20)$$

$$\forall (O_{ijk}) \in N, \quad a_{kq} = O_{ijk}$$

- $$\sum_{a_{kp} \in A_k \cup A_{k0}} X_{kpq} = 1, \quad \forall k, \forall a_{kq} \quad (3.2.21)$$

- $$\sum_{a_{kq} \in A_k} X_{k0q} = 1, \quad \forall k \quad (3.2.22)$$

- $$\sum_{a_{kq} \in A_k} X_{kpq} \leq 1, \quad \forall k, \forall a_{kp} \quad (3.2.23)$$

$$\bullet \quad \begin{aligned} JT_{ijk} + P_{ijk} - H \times (1 - Y_{kpq}) &\leq ST_{i'j'k}, \quad \forall (O_{ijk}, O_{i'j'k}) \in D_k \\ JT_{i'j'k} + P_{i'j'k} - H \times Y_{kpq} &\leq ST_{ijk}, \quad a_{kp} = O_{ijk}, a_{kq} = O_{i'j'k} \end{aligned} \quad (3.2.24)$$

$$\bullet \quad Y_{kpq} - X_{kpq} \geq 0, \quad \forall k, p, q \quad (3.2.25)$$

$$\bullet \quad Y_{kpq} + X_{kpq} \leq 1, \quad \forall k, p, q \quad (3.2.26)$$

As equações (3.2.12), (3.2.13) e (3.2.14) representam as minimizações do tempo total de fluxo, do atraso total e do tempo ocioso, respectivamente. A restrição (3.2.15) define o tempo de fluxo de cada item, que é o instante de início da última operação de um item mais seu tempo de processamento correspondente; a restrição (3.2.16) define a distância entre o tempo de fluxo e a data de entrega correspondente de um item; a restrição (3.2.17) define o *makespan* do sistema, que deve ser maior do que tempo de fluxo de todos os itens; a restrição (3.2.18) apresenta a relação de precedência entre duas operações consecutivas, j e j' , em que o instante de início do processamento de j' deve ser maior ou igual ao instante de conclusão de j do item i ; a restrição (3.2.19) considera a recirculação das operações; a restrição (3.2.20) define a relação entre os instantes de início de processamento e *setup* e, neste modelo, os autores consideraram todos os tempos de preparação e os tempos exatos destes são determinados por uma variável binária; a restrição (3.2.21) estipula que existe apenas uma operação predecessora para cada operação, isto é, o tempo de preparação de cada operação se torna fixo uma vez que sequência das operações é fixada; a restrição (3.2.22) estipula que apenas uma operação pode ser a primeira a ser processada em uma certa máquina k ; a restrição (3.2.23) define que cada operação tem no máximo uma sucessora na máquina k , exceção feita à última operação naquela máquina, que não possui nenhuma sucessora; a restrição (3.2.24) estabelece a sequência das operações que são processadas na mesma máquina k ; por fim, as restrições (3.2.25) e (3.2.26) definem a relação entre as variáveis Y_{kpq} e X_{kpq} .

3.2.4 Job Shop com bloqueio e com máquinas paralelas

O *Job Shop* com bloqueio ocorre quando existe limite de espaço de estocagem entre as estações de trabalho. Quando se atinge esse limite, a operação fica bloqueada na máquina predecessora, até que haja espaço nesse estoque intermediário. O artigo de Liu e Kozan (2009) traz uma aplicação real desse problema, em que se modela um problema de programação de trens como um problema de Programação da Produção em *Job Shop* com bloqueio e máquinas paralelas. No modelo proposto pelos autores, os trens, as estradas de ferro simples e duplas equivalem, respectivamente, aos itens, máquinas únicas e máquinas paralelas no contexto da Programação da Produção. As operações são consideradas como o movimento ou travessia de uma seção.

Notação

- n – número de itens (trens);
- m – número de máquinas (seções);
- J_i – item i ($i = 1, 2, \dots, n$) ;
- M_k – máquina k ($k = 1, 2, \dots, m$) ;
- h_k – número de unidades da máquina k . O padrão é máquina única $h_k = 1$;
- u_l – a l -ésima unidade da máquina k ($l = 1, \dots, h_k$) ;
- o – índice da posição na sequência da operação em um item $o = (1, 2, \dots, m)$;
- s_{ilk} – instante de início do item i na l -ésima unidade da máquina k ;
- p_{ilk} – tempo de processamento do item i na l -ésima unidade da máquina k ;
- $r_{iolk} = 1$, se a o -ésima operação do item i requer a l -ésima unidade da máquina k ; 0, caso contrário;
- $x_{ilk} = 1$, se o item i é designado à l -ésima unidade da máquina k ; 0, caso contrário;

- $y_{ijlk} = 1$, se ambos os itens i e j são designados à l -ésima unidade da máquina k e i precede, não necessariamente de modo imediato, j ; 0, caso contrário
- $w_{ijolk} = 1$, se a o -ésima operação do item i requer a l -ésima unidade da máquina k e o item j está programado nesta mesma unidade como seu sucessor; 0, caso contrário;
- C_{\max} – *makespan*;
- L – um número muito grande.

Modelo Matemático

$$\bullet \quad \text{Min } C_{\max} \quad (3.2.27)$$

Sujeito a:

$$\bullet \quad \sum_{l=1}^{h_k} \sum_{k=1}^m r_{iolk} (s_{ilk} + p_{ilk}) \leq \sum_{l=1}^{h_k} \sum_{k=1}^m r_{i,o+1,l,k} s_{ilk} \quad (3.2.28)$$

$$o = 1, 2, \dots, m-1 \quad \forall i$$

$$\bullet \quad s_{ilk} \geq s_{jlk} + p_{jlk} + L(y_{ijlk} - 1) \quad \forall i, j, l, k \quad (3.2.29)$$

$$\bullet \quad s_{jlk} \geq s_{ilk} + p_{ilk} + L(y_{jilk} - 1) \quad \forall i, j, l, k \quad (3.2.30)$$

$$\bullet \quad y_{ijlk} + y_{jilk} \leq 1 \quad \forall i, j, l, k \quad (3.2.31)$$

$$\bullet \quad \sum_{l=1}^{h_k} \sum_{k=1}^m x_{ilk} = 1 \text{ e } x_{ilk} + x_{jlk} - 1 \leq y_{ijlk} + y_{jilk} \quad \forall i, j, l, k \quad (3.2.32)$$

$$\bullet \quad \sum_{l=1}^{h_k} \sum_{k=1}^m r_{imlk} (s_{ilk} + p_{ilk}) \leq C_{\max} \quad \forall i \quad (3.2.33)$$

$$\bullet \quad s_{ilk}, p_{ilk} \geq 0 \quad \forall i, l, k \quad (3.2.34)$$

$$\bullet \quad \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^{h_k} \sum_{k=1}^m r_{jolk} S_{jlk} w_{ijolk} \geq \sum_{l=1}^{h_k} \sum_{k=1}^m r_{i,o+1,l,k} S_{ilk} \quad (3.2.35)$$

$$i \neq j; \quad o = 1, 2, \dots, m-1; \quad \forall i$$

A equação (3.2.27) minimiza o *makespan*; a restrição (3.2.28) define que o instante de início da $(o+1)$ -ésima operação do item i não pode ser antes do instante de conclusão da o -ésima operação desse mesmo item; a restrição (3.2.29) define que ambos os itens i e j são processados na l -ésima unidade da máquina k e que o item i é predecessor, não necessariamente imediato, de j ; a restrição (3.2.30) define que ambos os itens i e j são processados na l -ésima unidade da máquina k e que o item j é predecessor, não necessariamente imediato, de i ; a restrição (3.2.31) impõe que as condições de precedência em que i precede j ou que j precede i são exclusivas; a restrição (3.2.32) estipula que cada unidade pode processar ao máximo um item de cada vez; a restrição (3.2.33) define que o tempo de conclusão da última operação de cada item não pode ser anterior ao *makespan*; a restrição (3.2.34) satisfaz a condição de não negatividade; por fim, a restrição (3.2.35) define as condições de bloqueio e exprime que o instante de início da operação sucessora na mesma máquina deve ser maior ou igual ao instante de início da operação sucessora do mesmo item, para cada operação.

3.2.5 Job Shop estocástico

Problemas estocásticos são aqueles em que a incerteza, no que tange aos dados e parâmetros do problema, como tempos de processamento, datas de liberação, instantes de início das operações, etc., tem significância para o problema em questão. No artigo de Tavakkoli-Moghaddam et al. (2005) tem-se um modelo matemático não linear que aborda a temática do Job Shop estocástico. Nesse trabalho, os autores consideraram que o tempo de processamento de todas as peças em cada máquina segue uma distribuição estocástica especial.

Notação

- $M = \{1, \dots, m\}$: conjunto de máquinas, onde m é o número de máquinas;

- $P = \{1, \dots, p\}$: conjunto de peças, onde p é o número de peças;
- j – índice de operação necessário para a peça p , onde $j = 1, 2, \dots, O_p$;
- E_{tjpm} – tempo esperado necessário para se processar a operação j da peça p na máquina m ;
- V_{tjpm} – : variância do tempo necessário para se processar a operação j da peça p na máquina m ;
- $a_{jpm} = \begin{cases} 1, & \text{se está disponível para processar a operação } j \text{ da peça } p \text{ na máquina } m \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$;
- D_p – tempo de entrega da peça p ;
- C_m – custo operacional da máquina m em cada unidade de tempo;
- I_m – custo da ociosidade da máquina m em cada unidade de tempo;
- O_{jpm} – operação j da peça p na máquina m ;
- $X_{jpms} = \begin{cases} 1, & \text{se a operação } j \text{ da peça } p \text{ é alocada na máquina } m \text{ na sequência } s \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$;
- Y_{jpms} – instante de início do processamento da operação j da peça p na máquina m na sequência s ;
- t_{jpma} – tempo ótimo necessário para a operação j da peça p na máquina m conforme o intervalo de confiança α .

Modelo matemático

$$\begin{aligned}
Min Z = & \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} (Y_{j_{\max} pms} + X_{j_{\max} pms} \cdot t_{j_{\max} pm} - D_p) \\
& + \sum_{m=1}^M C_m \cdot \left(\sum_{s=1}^S \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} X_{j pms} \cdot t_{jpm} \right) \\
& + \sum_{i=1}^M I_m \cdot \left(\sum_{s=1}^{S-1} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} MAX(Y_{jpm(s+1)} - Y_{j pms} - X_{j pms} \cdot t_{jpm}, 0) \right)
\end{aligned} \tag{3.2.36}$$

Sujeito a:

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S a_{jpm} X_{j pms} = 1 \quad \forall j, p \tag{3.2.37}$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} X_{j pms} \leq 1 \quad \forall m, s \tag{3.2.38}$$

$$Y_{j pms} \leq R X_{j pms} \quad \forall j, p, m, s \tag{3.2.39}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S (Y_{j pms} + X_{j pms} t_{jpm}) \leq \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S (Y_{(j+1) pms}) \quad \forall j, p \tag{3.2.40}$$

$$\sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} (Y_{j pms} + X_{j pms} t_{jpm}) \leq \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^{O_p} (Y_{jpm(s+1)}) \quad \forall m, s \tag{3.2.41}$$

$$E_{tjpm} - Z_{\alpha/2} V_{tjpm} \leq t_{jpm} \leq E_{tjpm} + Z_{\alpha/2} V_{tjpm} \quad \forall j, p, m \tag{3.2.42}$$

$$X \in [0, 1], \quad Y \geq 0, \quad R \gg 0 \tag{3.2.43}$$

A função objetivo (equação (3.2.36)) é inteira e não linear, visando à minimização da soma da variação dos tempos real e planejado de processamento, dos custos operacionais e dos custos da ociosidade para cada máquina em um horizonte de planejamento. A primeira parte da função calcula a soma das variações entre os tempos planejado e real de processamento na série temporal. Esta soma é igual ao instante de início da operação j da peça p na máquina m na sequência s e otimiza o tempo necessário para processar a operação j da peça p na máquina m com respeito à porcentagem do intervalo de confiança se a operação foi alocada à máquina correta. A segunda parte da função objetivo calcula os custos operacionais

de cada máquina. Este custo é igual à soma das mutilações dos tempos exigidos para todos os tipos de máquinas no custo operacional daquela máquina. A terceira parte da função objetivo calcula o tempo ocioso das máquinas. Neste caso, se nenhuma peça é alocada à máquina e esta mantém-se ociosa, haverá custo de ociosidade para a máquina.

Respectivo às restrições, a restrição (3.2.37) garante que cada operação para cada peça pode ser alocada a apenas uma máquina na sequência; a restrição (3.2.38) apresenta que apenas uma operação pode estar em cada sequência em uma máquina; a restrição (3.2.39) garante a finitude do instante de início do processamento; a restrição (3.2.40) garante as sequências das operações para cada peça; a restrição (3.2.41) apresenta que o tempo de processamento de cada operação não tem *overlap* com qualquer outro; a restrição (3.2.42) considera um intervalo de confiança para o processamento das operações; e a restrição (3.2.43) define o domínio das variáveis.

3.3 OPEN SHOP

Nesta seção mostra-se e detalha-se, no que concerne aos aspectos inerentes à modelagem matemática do problema, cinco modelos representativos de características comumente encontradas em problemas de *Open Shop*.

3.3.1 *Open Shop* com Preempção

Problemas da classe preemptiva são aqueles em que a tarefa ou operação pode ser interrompida antes da totalidade de seu processamento e retornar à mesma estação de trabalho e posteriormente ser completada. No artigo de Liaw (2004) tem-se um exemplo de modelo que representa a preempção em problemas de *Open Shop*. Nesse trabalho, o autor trata de um modelo com duas máquinas, com o intuito de minimizar o tempo ponderado de conclusão total.

Modelo Matemático

$$\bullet \quad \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^l w_i y_k z_{il} \quad (3.3.1)$$

Sujeito a:

- $$\sum_{i=1}^n x_{ijk} \leq y_k, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.2)$$

- $$\sum_{j=1}^m x_{ijk} \leq y_k, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.3)$$

- $$\sum_{k=1}^n x_{ijk} = p_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3.3.4)$$

- $$\sum_{l=1}^n z_{il} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.5)$$

- $$x_{ijk} \leq M(1 - z_{il}), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad k > l = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.6)$$

- $$z_{il} = 0 \text{ ou } 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.7)$$

- $$y_k, x_{ijk} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3.3.8)$$

A função objetivo (equação (3.3.1)) minimiza o tempo ponderado total de conclusão. As restrições (3.3.2) e (3.3.3) requerem que para cada intervalo $[C_{[k-1]}, C_{[k]}]$ a quantidade de tempo de processamento designada a cada máquina M_j e a cada item J_i , respectivamente, não seja maior que o intervalo de tamanho y_k . A restrição (3.3.4) requer que cada operação seja completada. A restrição (3.3.5) impõe que cada item ocupe exatamente uma posição na sequência, enquanto a restrição (3.3.6) estipula que os itens não podem ser processados em qualquer máquina após o tempo de conclusão deles, sendo M um número muito grande. As restrições (3.3.7) e (3.3.8) são de domínio das variáveis componentes do problema.

3.3.2 Open Shop sem espera

Problemas com essa característica são aqueles em que não existe ociosidade entre as operações, ou seja, estas são processadas de modo contínuo nas estações de trabalho. O artigo de Huang e Lin (2008) traz uma aplicação na prática de um

problema de *Open Shop* sem espera. Nesse trabalho, os autores tratam do problema de manuseio de tubulações para abastecimento de água e gás e redes elétricas em construções de estradas. Faz-se aqui a suposição de que há n unidades construtivas (companhias de gás, água, elétrica), cada uma com o propósito de instalar tubulações nos m setores da estrada.

Cada setor pode ser considerado como um estágio de processamento. Cada item processado em cada setor da estrada pode ser visto como uma operação realizada nos estágios de processamento. Para cada unidade construtiva, a sequência das operações nos setores da estrada é ajustável. Cada item é processado por uma máquina dedicada de propriedade de cada unidade construtiva.

Essas unidades movem as máquinas dedicadas para os diferentes setores da estrada quando as operações são processadas. Considerando-se a eficiência, as m operações de cada item devem ser processadas nos m setores da estrada de modo contínuo. Portanto, as máquinas dedicadas são imediatamente deslocadas para seções pré-determinadas da estrada assim que a necessidade surge. Há a possibilidade que múltiplos itens sejam processados simultaneamente no mesmo setor da estrada. O objetivo do estudo é minimizar o período de custos sociais como a poluição do ar, os congestionamentos, entre outros, chamado nesse trabalho de tempo de ocupação (representado pela variável D), expressando a preocupação do trabalho com a responsabilidade ambiental.

No que concerne à Programação da Produção, o problema apresentado como um *Open Shop* multi estágio com máquinas dedicadas movimentáveis e sem espera.

Notação

- j – item, $j \in J = \{1, 2, \dots, n\}$;
- k – estágio de processamento, $k \in K = \{1, 2, \dots, m\}$;
- s – posição na sequência, $s \in S = \{1, 2, \dots, m\}$;
- t_{jk} – tempo de processamento de O_{jk} . Defina $t_{jk} = 0$ se o item j não possui operação no estágio de processamento k ;

- $y_{jks} = 1$, se a operação O_{jk} está na s -ésima posição na sequência; 0, caso contrário;
- C_{jk} – tempo de conclusão da operação O_{jk} ;
- A_{jk} – instante de início da operação O_{jk} ;
- $C_{\max,k}$ – *makespan* do estágio de processamento k ;
- $A_{\min,k}$ – menor instante de início do estágio de processamento k ;

Modelo Matemático

- $$\text{Min } D = \sum_{k=1}^m (C_{\max,k} - A_{\min,k}) \quad (3.3.9)$$

Sujeito a:

- $$\sum_{s=1}^m y_{jks} = 1, \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.10)$$

- $$\sum_{k=1}^m y_{jks} = 1, \quad j \in J, s \in S \quad (3.3.11)$$

- $$C_{jk} = t_{jk} + \sum_{s=2}^m \sum_{l=1, l \neq k}^m \sum_{h=1}^{s-1} (y_{jks} \times y_{jlh} \times t_{jl}), \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.12)$$

- $$A_{jk} = C_{jk} - t_{jk}, \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.13)$$

- $$C_{\max,k} \geq C_{jk}, \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.14)$$

- $$A_{\min,k} \leq A_{jk}, \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.15)$$

- $$C_{jk} \geq 0, \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.16)$$

- $$A_{jk} \geq 0, \quad j \in J, k \in K \quad (3.3.17)$$

- $$y_{jks} \in \{0,1\}, \quad j \in J, k \in K, s \in S \quad (3.3.18)$$

A função objetivo (equação (3.3.9)) minimiza o tempo total de ocupação dos m estágios de processamento. A restrição (3.3.10) indica que cada operação de um item deve ser arranjada a exatamente uma posição na sequência. A restrição (3.3.11) impõe que apenas uma das m operações do item j pode ser acomodada numa posição específica da sequência. A restrição (3.3.12) identifica o tempo de conclusão da operação O_{jk} sob a condição sem espera que caracteriza o problema em questão. A restrição (3.3.13) exprime que o tempo de início de uma operação é igual ao seu tempo de conclusão menos o tempo de processamento desta. A restrição (3.3.14) impõe que o *makespan* deve ser maior ou igual ao instante de conclusão de O_{jk} . A restrição (3.3.15) identifica o menor instante de início de O_{jk} . Por fim, as restrições (3.3.16)-(3.3.18) são de domínio das variáveis.

3.3.3 *Open Shop* com multiprocessadores proporcionais

O problema de *Open Shop* com multiprocessadores é a combinação entre os problemas clássicos de *Open Shop* e de máquinas paralelas. O artigo de Matta (2009) traz uma aplicação desse tipo de problema motivada pelo fluxo dos pacientes em um grande centro de oncologia no Centro Médico da Universidade de Duke. Nesse centro, há quatorze instalações destinadas a exames como Tomografia Computadorizada, Ressonância Magnética, Raios X, entre outros. Nesse contexto, há duas características relevantes nesse modelo: os testes podem ser realizados em qualquer ordem (caráter “*open shop*” do modelo) e qualquer tipo de teste requer pacientes levem aproximadamente o mesmo tempo de processamento, independentemente de sexo, idade ou doença (caráter “proporcional” do problema).

Notação

- N – conjunto de itens a ser processados com $|N| = n$;
- S – conjunto de estágios e l define um estágio, $l = 1, \dots, s$ com $|S| = s$;
- M_l – conjunto de máquinas no estágio l com $|M_l| = m_l$;

- k – índice da máquina onde k varia entre 1 e $\sum_{l=1}^s m_l$;
- p_i – tempo de processamento no estágio l ;
- H – um número muito grande escolhido para ser maior que qualquer tempo máximo de conclusão;
- τ – limite superior do tempo de processamento para todos os itens;
- $x_{j,k,t} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } j \text{ inicia na máquina } k \text{ no tempo } t \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$;
 $\forall j \in N; \forall k \in \bigcup_{l \in S} M_l; \forall t \in \{1, \dots, \tau\}$
- $\delta_{j,q,r} = \begin{cases} 1, & \text{se o estágio } r \text{ é processada após o estágio } q \text{ para o item } j \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$;
 $\forall j \in N; \forall q, r \in S, q < r$
- $\beta_{j,j',k} = \begin{cases} 1, & \text{se o item } j \text{ precede } j' \text{ na máquina } k \\ 0, & \text{c.c} \end{cases}$;
 $\forall j, j' \in N; \forall k \in \bigcup_{l \in S} M_l$
- C_{\max} – *makespan*;

Simplificações de notação

- $U_l = \tau - p_l + 1$;
- $U_q = \tau - p_q + 1$;
- $U_r = \tau - p_r + 1$;

Essas simplificações são definidas como o último instante de início do processamento de um item nos estágios l, q e r , respectivamente. Estas aparecem nos somatórios do modelo matemático.

Modelo Matemático

- $$\text{Min } C_{\max} \quad (3.3.19)$$

Sujeito a:

- $$\sum_{t=1}^{U_l} \sum_{k \in M_l} x_{j,k,t} = 1, \quad \forall j \in N; \forall l \in S \quad (3.3.20)$$

- $$\sum_{j \in N} \sum_{k \in M_l} x_{j,k,t} \leq m_l, \quad \forall l \in S; \forall t \in \{1, \dots, \tau\} \quad (3.3.21)$$

- $$\sum_{t=1}^{U_q} \sum_{k \in M_q} tx_{j,k,t} \geq \sum_{t=1}^{U_r} \sum_{k \in M_r} tx_{j,k,t} + p_q - H\delta_{j,q,r} \quad (3.3.22)$$

$$\forall j \in N; q, r \in S, q < r$$

- $$\sum_{t=1}^{U_r} \sum_{k \in M_r} tx_{j,k,t} \geq \sum_{t=1}^{U_q} \sum_{k \in M_q} tx_{j,k,t} + p_q - H(1 - \delta_{j,q,r}) \quad (3.3.23)$$

$$\forall j \in N; q, r \in S; q < r$$

- $$\sum_{t=1}^{U_l} tx_{j,k,t} - \sum_{t=1}^{U_l} tx_{j',k,t} \geq p_l \left(\sum_{t=1}^{U_l} x_{j,k,t} + \sum_{t=1}^{U_l} x_{j',k,t} - 1 \right) \quad (3.3.24)$$

$$-H \left(2 - \sum_{t=1}^{U_l} x_{j,k,t} + \sum_{t=1}^{U_l} x_{j',k,t} + \beta_{j,j',k} \right)$$

$$\forall j, j' \in N; j \neq j'; \forall k \in M_l; \forall l \in S$$

- $$\sum_{t=1}^{U_l} tx_{j',k,t} - \sum_{t=1}^{U_l} tx_{j,k,t} \geq p_l \left(\sum_{t=1}^{U_l} x_{j,k,t} + \sum_{t=1}^{U_l} x_{j',k,t} - 1 \right) \quad (3.3.25)$$

$$-H \left(3 - \sum_{t=1}^{U_l} x_{j,k,t} + \sum_{t=1}^{U_l} x_{j',k,t} - \beta_{j,j',k} \right)$$

$$\forall j, j' \in N; j \neq j'; \forall k \in M_l; \forall l \in S$$

- $$C_{\max} \geq \sum_{t=1}^{U_l} tx_{j,k,t} + p_l, \quad \forall j \in N; \forall k \in M_l; \forall l \in S \quad (3.3.26)$$

- $$x_{j,k,t} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N; \forall k \in \bigcup_{l \in S} M_l; \forall t \in \{1, \dots, \tau\} \quad (3.3.27)$$

- $$\delta_{j,q,r} \in \{0,1\}, \quad \forall j \in N; q, r \in S; q < r \quad (3.3.28)$$

$$\bullet \quad \beta_{j,j',k} \in \{0,1\}, \quad \forall j,j' \in N; j < j'; \forall k \in \bigcup_{l \in S} M_l \quad (3.3.29)$$

A função objetivo (equação (3.3.19)) minimiza o *makespan*. A restrição (3.3.20) garante que cada item em alguma máquina em cada estágio l em algum tempo $t \leq \tau - p_l + 1$, onde τ é algum limite superior do horizonte de planejamento. A restrição (3.3.21) impõe que o número total de itens iniciados no estágio l deve ser menor ou igual ao número de máquinas no estágio l . As restrições (3.3.22) e (3.3.23) garantem que o instante de início do item j no estágio l deve estar separado do seu instante de início no estágio anterior por pelo menos o tempo de processamento naquele estágio. As restrições (3.3.24) e (3.3.25) garantem que os instantes de início de dois itens na mesma máquina devem estar separados o tempo de processamento deles naquela máquina. A restrição (3.3.26) é usada para calcular o *makespan*. As restrições (3.3.27)-(3.3.29) especificam que as variáveis de decisão do modelo são binárias.

3.3.4 *Open Shop* com *Setup* Dependente da Sequência

Problemas com essa característica são aqueles que mais se aproximam da realidade, pois algum tempo de preparação é realizado antes do processamento de um item e, via de regra, a magnitude desse tempo depende da ordem entre dois itens consecutivos, portanto, caracterizando o problema com *setup* dependente da sequência. O artigo de Naderi et al. (2011), que visa à minimização do tempo de conclusão total, traz um modelo matemático de *Open Shop* com *setup* dependente da sequência e com outras características importantes, como a impossibilidade de preempção dos itens, a existência de *buffers* infinitos e a desconsideração dos tempos de transporte.

Notação

- n – número de itens;
- m – número de máquinas;
- j – índice para itens $\{1, 2, \dots, n\}$;

- k – índice para itens $\{0,1,2,\dots,n\}$;
- i,l – índices para máquinas $\{1,2,\dots,m\}$;
- $O_{j,i}$ – operação j na máquina i ;
- $p_{j,i}$ – tempo de processamento da operação j na máquina i ;
- $S_{j,i,k}$ – tempo de *setup* do item j que é sucessor imediato do item k na máquina i ;
- d_j – data de entrega do item j ;
- M – um número positivo muito grande;
- $Y_{j,i,k} = 1$ se $O_{j,i}$ é processada imediatamente após $O_{k,i}$ e 0, caso contrário, com $k \neq j$;
- $X_{j,i,l} = 1$ se $O_{j,l}$ é processada, não necessariamente imediatamente após, $O_{j,i}$ e 0, caso contrário, com $i \in \{1,2,\dots,m-1\}, l > i$;
- $C_{j,i}$ – tempo de conclusão de $O_{j,i}$;
- C_j – tempo de conclusão do item j ;

Modelo Matemático

$$\bullet \quad \text{Min} \sum_{j=1}^n C_j \quad (3.3.30)$$

Sujeito a:

$$\bullet \quad \sum_{k=0, k \neq j}^n Y_{j,i,k} = 1, \quad \forall j, i \quad (3.3.31)$$

$$\bullet \quad \sum_{j=1, j \neq k}^n Y_{j,i,k} \leq 1, \quad \forall i, k > 0 \quad (3.3.32)$$

- $$\sum_{j=1}^n Y_{j,i,0} = 1, \quad \forall i \quad (3.3.33)$$

- $$Y_{j,i,k} + Y_{k,i,j} \leq 1, \quad \forall i, j < n, k > j \quad (3.3.34)$$

- $$C_{j,i} \geq C_{k,i} + p_{j,i} + S_{j,i,k} - (1 - Y_{j,i,k}) \times M, \quad \forall j, i, k, k \neq j \quad (3.3.35)$$

- $$C_{j,i} \geq C_{j,l} + p_{j,i} + \sum_{k=0, k \neq j}^n (Y_{j,i,k} \times S_{j,i,k}) - (1 - X_{j,i,l}) \times M \quad (3.3.36)$$

$$\forall j, i < m, l > i$$

- $$C_{j,l} \geq C_{j,i} + p_{j,l} + \sum_{k=0, k \neq j}^n (Y_{j,l,k} \times S_{j,l,k}) - (X_{j,i,l}) \times M \quad (3.3.37)$$

$$\forall j, i < m, l > i$$

- $$C_j \geq C_{j,i}, \quad \forall j, i \quad (3.3.38)$$

- $$C_j, C_{j,i} \geq 0, \quad \forall j, i \quad (3.3.39)$$

- $$X_{j,i,l} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, i < m, l > i \quad (3.3.40)$$

- $$Y_{j,i,k} \in \{0, 1\}, \quad \forall j, i, k \neq j \quad (3.3.41)$$

- $$C_{0,i} = 0 \quad (3.3.42)$$

A função objetivo (equação (3.3.30)) minimiza o tempo de conclusão total. O conjunto de restrições (3.3.31) força com que todo item j é programado exatamente uma vez em cada máquina i . O conjunto de restrições (3.3.32) garante que cada item tem no máximo um sucessor em cada máquina. O conjunto de restrições (3.3.33) especifica que o item 0 pode ser predecessor exatamente de um item em cada máquina. O conjunto de restrições (3.3.34) evita a precedência cruzada, isto é, um item não pode, ao mesmo tempo, ser o predecessor e o sucessor de outro item. O conjunto de restrições (3.3.35) força que $O_{j,i}$ não pode iniciar antes de $O_{k,i}$ e *setups* necessários são completados se $O_{j,i}$ é processado imediatamente após $O_{k,i}$. Os conjuntos de restrições (3.3.36) e (3.3.37) são um par dicotômico de restrições

relacionando cada par de operações de cada item. O conjunto de restrições (3.3.38) calcula o tempo de conclusão do item j . Por fim, os conjuntos de restrições (3.3.39), (3.3.40) e (3.3.41) determinam a natureza das variáveis de decisão.

3.3.5 *Open Shop* com objetivo de minimizar a soma dos tempos de conclusão quadráticos

Problemas de *Open Shop* com este critério de otimalidade são adequados quando existe uma importante variação nos tempos de processamento, o que o diferencia de demais formulações clássicas, em que os tempos de processamento são constantes e conhecidos *à priori*. Um exemplo que Zhang e Bai (2014) trazem é o do setor de emergências de um hospital, em que o custo e tempo de tratamento para um paciente emergencial pode aumentar significativamente se a condição deste se tornar mais grave em razão da espera por salas de exames ou salas de cirurgia. Esse tipo de estudo se baseia na premissa de quanto maior o tempo para que um item seja concluído, maior é o custo por unidade de tempo despendido.

Notação

- N – conjunto de itens indexados por j , $N = \{1, 2, \dots, n\}$, n é o número de itens;
- M – conjunto de máquinas indexados por i , $M = \{1, 2, \dots, m\}$, m é o número de máquinas disponíveis;
- K – tamanho do horizonte de tempo, $K = \max\{m, n\}$, $p_{\max} = \max\{p_{ij}\}$;
- k – índice do período, $k \in \{1, 2, \dots, K\}$;
- $O_{(i,j)}$ – operação do item j na máquina i ;
- C_j – tempo de conclusão do item j ;
- C_{ij} – tempo de conclusão do item j na máquina i ;
- p_{ij} – tempo de processamento do item j na máquina i ;

- $x_{ijk} = 1$ se $O_{(i,j)}$ está sendo conduzida no tempo k ; 0, caso contrário;

Modelo Matemático

- $$\min \sum_{j=1}^n C_j^2 \quad (3.3.43)$$

Sujeito a:

- $$C_j \geq C_{ij}, \quad \forall j \in N, i \in M \quad (3.3.44)$$

- $$\sum_{k=1}^K x_{ijk} = p_{ij}, \quad \forall j \in N, i \in M \quad (3.3.45)$$

- $$k \times x_{ijk} \leq C_{ij}, \quad \forall j \in N, i \in M, k = 1, \dots, K \quad (3.3.46)$$

- $$C_{ij} - p_{ij} + 1 \leq k + 1(-x_{ijk})K, \quad \forall j \in N, i \in M, k = 1, \dots, K \quad (3.3.47)$$

- $$\sum_{i=1}^m x_{ijk} \leq 1, \quad \forall j \in N, k = 1, \dots, K \quad (3.3.48)$$

- $$\sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq 1, \quad \forall i \in M, k = 1, \dots, K \quad (3.3.49)$$

- $$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in N, i \in M, k = 1, \dots, K \quad (3.3.50)$$

A função objetivo (equação (3.3.43)) minimiza a soma dos tempos de conclusão quadráticos em um ambiente *Open Shop*. A restrição (3.3.44) garante que o tempo de conclusão do item j é maior ou igual ao tempo de conclusão do item j na máquina i . A restrição (3.3.45) assegura que durante todo o horizonte de tempo, o tempo total da operação $O_{(i,j)}$ é igual ao tempo de processamento p_{ij} . A restrição (3.3.46) define o tempo de conclusão da operação $O_{(i,j)}$. A restrição (3.3.47) força a continuidade da operação $O_{(i,j)}$. A restrição (3.3.48) garante que a cada unidade de tempo, o item j pode ser processado em não mais que uma máquina. A restrição (3.3.49) estipula que

a cada periodo em cada máquina não há mais do que um item sendo processado. Por fim, o conjunto de restrições (3.3.50) definem as variáveis binárias padrão.

4 METODOLOGIA

A metodologia trata da forma de se fazer ciência, a partir do cuidado com as ferramentas, com os procedimentos, com o caminho (DEMO, 1985). Nesse sentido, este capítulo aborda aspectos correlatos à classificação da pesquisa, à apresentação do protocolo desta e à maneira como ela será conduzida. (como usei o pajek – modo de uso software) – mais coisas correlatas a isso

4.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho é classificado como Pesquisa Básica, quanto à sua natureza, pois busca gerar novos conhecimentos sem preocupação com uma aplicação prática. Quanto aos seus objetivos, trata-se de uma Pesquisa Exploratória, por apresentar a Programação da Produção do ponto de vista de seus aspectos mais relevantes, descritos no levantamento bibliográfico e descritiva, no que concerne à especificação dos ambientes fabris e tipos de problemas encontrados no estudo do *shop scheduling*. Quanto à abordagem, o presente trabalho tem caráter Quantitativo, pois os artigos aqui descritos serão classificados e analisados em métricas como número de publicações por periódico. Mas também existe, até certo ponto, um caráter Qualitativo, pois existe a necessidade de explicar as causas de determinada ocorrência atinente à Programação da Produção, como a grande quantidade de artigos que tratam acerca da minimização do *makespan*. Por fim, quanto ao procedimento utilizado nesse estudo, será feita uma Revisão Sistemática da Literatura a respeito dos ambientes que compõem o *Shop Scheduling*.

4.2 DESCRIÇÃO METODOLÓGICA

Como anteriormente mencionado, o procedimento metodológico utilizado no desenvolvimento do presente estudo é a Revisão Sistemática da Literatura (RSL). A RSL é definida como o processo de coleta, conhecimento, compreensão, análise, síntese e avaliação de um conjunto de artigos científicos a fim de criar um estado da arte acerca de um determinado tópico ou assunto examinado (LEVY; ELLIS, 2006).

Este tipo de procedimento é comumente encontrado em estudos respectivos à área médica, como observado nos trabalhos de Michie e Williams (2003) e de Avouac, Gossec e Dougados (2006). Dentro desse contexto, a Colaboração Cochrane é referência internacional na construção e validação de revisões sistemáticas e o Cochrane *Handbook* é considerado o guia em que se encontra todos os passos necessários para a correta execução de tal procedimento.

Em relação ao modo com que se utiliza esse procedimento, adotou-se na concepção e realização do presente estudo os sete passos recomendados pela Colaboração Cochrane. Estes passos serão aqui brevemente descritos e ao fim dessa descrição será apresentado a maneira como cada passo será realizado neste trabalho. São eles:

1. Formulação da pergunta: nesse ponto, quando a questão que orienta a pesquisa é bem formulada, tem-se clareza sobre o que deve ser incluído ou não na revisão a ser elaborada. No presente trabalho, o que norteia a revisão sistemática é a temática do *Shop Scheduling* e a pergunta a ser respondida nesse trabalho é alusiva às lacunas existentes na literatura a respeito do tema, ou seja, fez-se ponderações relativas aos pontos pouco explorados em cada um dos ambientes fabris englobados nessa temática (*Flow Shop*, *Job Shop* e *Open Shop*);
2. Localização e seleção de estudos: nesse aspecto, deve-se investigar em diversas fontes de busca de estudos, sejam bases de dados eletrônicas, periódicos, livros, entre outros. No presente estudo, os artigos escrutinizados por esta revisão sistemática foram coletados a partir de periódicos classificados nos níveis Q1 e Q2 do SCImago *Journal and Country Rank* 2015. Foram selecionados para essa revisão duzentos e cinquenta artigos de *Flow Shop*, publicados no período compreendido entre 1954 e 2015; duzentos e quarenta de *Job Shop*, publicados entre 1960 e 2015; e setenta de *Open Shop*, sendo o período analisado compreendido entre 1976 e 2015.
3. Avaliação crítica dos estudos: nesse ponto, determina-se quais estudos serão utilizados na revisão. Neste trabalho, os artigos selecionados são avaliados à luz das seguintes métricas:

- a. Ano: nessa métrica busca-se a avaliação da quantidade de artigos publicados por ano dentro de cada ambiente do *Shop Scheduling*, consoante às limitações de escopo;
- b. Tipo: nessa métrica se avalia o tipo do artigo estudado. Essa análise é realizada da seguinte maneira: o artigo é categorizado como Problemas quando o foco do mesmo é a apresentação de um problema específico a ser estudado; o estudo é classificado como Complexidade se o artigo trata, majoritariamente, a temática da complexidade computacional e, ou, estrutural do problema; o trabalho investigado é classificado na categoria Comparação quando o mesmo faz comparações de desempenho entre métodos resolutivos empregados pelo autor face às instâncias da literatura ou a outros trabalhos correlatos à temática de cada ambiente do *Shop Scheduling*; pode ser categorizado como *Review*, se o estudo se dedica apenas à apresentação dos problemas e métodos resolutivos, sem aplicá-los; o artigo estudado pode ser categorizado em mais de uma classe quando o estudo analisado trabalhou em mais de um desses temas, como por exemplo, quando o trabalho investigado fez ponderações correlatas tanto à categoria Problemas, quanto à categoria Complexidade, classifica-se o artigo como Pesquisa/Complexidade;
- c. Classe da Programação da Produção: aqui o ambiente fabril objeto da revisão é classificado em *off-line* e *online*;
- d. Modo de chegada dos itens: à luz dessa métrica, os ambientes referentes ao *Shop Scheduling* são aqui categorizados em estático ou dinâmico,
- e. Natureza dos dados: aqui os dados relativos aos ambientes correlatos ao *Shop Scheduling* de cada uma das publicações relativos a tempo de processamento, datas de entrega e liberação, são classificados em determinístico, quando os valores são fixos e conhecidos *à priori* e estocásticos, quando esses dados estão sujeitos ao efeito de alguma aleatoriedade, caracterizada por alguma distribuição de probabilidade;
- f. Característica do item: aqui são descritos e classificados os artigos no que concerne à característica do item (campo β da notação de Graham estudada).

Um exemplo de característica do item que pode ser contemplada é a presença de *deadlines* no modelo de *scheduling*;

- g. Critério de otimalidade: nessa métrica, faz-se a categorização dos artigos no que diz respeito ao critério de otimalidade (campo γ da notação de Graham). Um exemplo de critério de otimalidade amplamente utilizado nos artigos atinentes à temática da Programação da Produção é o *makespan*;
 - h. Método resolutivo: aqui há duas subcategorias a ser ponderadas: A primeira delas é concernente ao tipo de método resolutivo empregado, isto é, se foram utilizados métodos exatos, heurísticos, meta-heurísticos ou hibridações e, a segunda subclassificação se dá pela identificação do método resolutivo propriamente dito, isto é, finda a primeira subclassificação, em que se identifica que o artigo resolve o problema de Programação da Produção por meio da utilização de uma meta-heurística, a segunda subclassificação é responsável pela apresentação de qual meta-heurística o artigo faz uso quando do processo de resolução;
4. Coleta de dados: nessa fase todas as variáveis estudadas devem ser observadas e resumidas, avaliando-se suas características, a fim de determinar a comparabilidade dos estudos selecionados. No presente trabalho, essa fase foi realizada em conjunto com a fase 3, quando se apresentou as métricas utilizadas na categorização dos artigos de *Shop Scheduling*;
 5. Análise e apresentação dos dados: a partir de um agrupamento de estudos fundamentado nas similaridades, faz-se a escolha da forma de apresentação gráfica e numérica, com o intuito de facilitar o entendimento da revisão elaborada. No presente estudo, a partir das métricas responsáveis por classificar os problemas de Programação da Produção em cada uma das configurações produtivas, definiu-se duas formas de apresentação gráfica, quais sejam:
 - a. Os resultados tangentes às métricas referentes ao tipo, ano, classe da Programação da Produção, modo de chegada dos itens e natureza dos dados são apresentados em formato tabular e por meio de gráficos de colunas;
 - b. As análises respectivas à característica dos itens, aos critérios de otimalidade e aos métodos resolutivos são apresentadas por meio de redes confeccionadas no *software* Pajek de análise de redes. Essas redes serão construídas a partir da

relação de cada uma dessas métricas com os autores dos artigos analisados. No que diz respeito aos métodos resolutivos, estes tem também uma rede que fará a relação entre os tipos de métodos (exatos, heurísticos, etc.) com os métodos propriamente ditos (*Simulated Annealing*, Algoritmos Genéticos, etc.). Além disso, são elaboradas redes que mostrem os autores e, por extensão, os artigos, relacionando-os com os periódicos onde publicaram;

6. Interpretação dos dados: é determinada a aplicabilidade dos resultados obtidos e demais aspectos relevantes no que tange à obtenção da resposta ao problema de pesquisa proposto. Nesse estudo, após as análises realizadas na fase 5 são tecidas considerações acerca de campos ou lacunas inexploradas nos artigos englobados na amostra empregada na elaboração e consecução da presente revisão;
7. Aprimoramento e atualização da revisão: a partir da publicação da revisão realizada, a mesma poderá sofrer críticas e receberá sugestões que devem ser incorporadas às edições subsequentes e ainda ser atualizada quando do surgimento de novos estudos concernentes ao tema. No presente estudo, essa fase não pertence ao escopo do trabalho.

5 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DE *FLOW SHOP*

Neste capítulo procede-se a RSL de *Flow Shop* em consonância com o exposto no capítulo anterior. Ao todo, foram escrutinizados duzentos e cinquenta artigos que abrangeram esse ambiente fabril, num estrato temporal compreendido entre 1954 – data de publicação do trabalho seminal de Johnson – até 2015. Estes encontram-se descritos no Quadro 1. Nas seções subsequentes faz-se a avaliação dos artigos à luz das métricas componentes da presente proposta taxonômica.

QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (continua)

Autor	Periódico
Johnson (1954)	Naval Research Logistics Quarterly
Ignall; Schrage (1965)	Operations Research
McMahon; Burton (1967)	Operations Research
Smith; Dudek (1967)	Operations Research
Ashour (1970)	A I I E Transactions
Gupta; Dudek (1971)	A I I E Transactions
Sahney (1971)	A I I E Transactions
Cunningham; Dutta (1973)	Naval Research Logistics Quarterly
Corwin; Esogbue (1974)	Naval Research Logistics Quarterly
Van Deman; Baker (1974)	A I I E Transactions
Burns; Rooker (1975)	Naval Research Logistics Quarterly
Gupta (1975)	Computers & Operations Research
Panwalkar; Khan (1975)	Naval Research Logistics
Smith et al. (1975)	Management Science
Gupta (1976)	Naval Research Logistics Quarterly
Smith et al. (1976)	Naval Research Logistics Quarterly
Dannenbring (1977)	Management Science
Panwalkar; Khan (1977)	Naval Research Logistics
Szwarc (1977)	Naval Research Logistics Quarterly
Gupta (1979)	Computers & Operations Research
Arora; Rana (1980)	A I I E Transactions
Potts (1980)	European Journal of Operational Research
Szwarc (1981a)	Naval Research Logistics Quarterly
Szwarc (1981b)	Naval Research Logistics Quarterly
Adiri; Pohoryles (1982)	Naval Research Logistics Quarterly
Pinedo (1982)	Operations Research
Forst (1983)	Operations Research Letters
Graves et al. (1983)	Journal of Operations Management
Nawaz et al. (1983)	Omega
Szwarc (1983a)	I I E Transactions
Szwarc (1983b)	Naval Research Logistics Quarterly
Adiri; Frostig (1984)	Operations Research Letters

QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (continuação)

Foley; Suresh (1984)	Naval Research Logistics Quarterly
Hariri; Potts (1984)	European Journal of Operational Research
Frostig; Adiri (1985)	Naval Research Logistics Quarterly
Woollam; Sambandam (1985)	Computers & Industrial Engineering
Boxma; Forst (1986)	Operations Research Letters
Foley; Suresh (1986)	Naval Research Logistics Quarterly
Gupta; Darrow (1986)	European Journal of Operational Research
Woollam (1986)	Computers & Industrial Engineering
Szwarc; Gupta (1987)	Naval Research Logistics
Turner; Booth (1987)	Omega
Nowicki; Zdrzałka (1988)	European Journal of Operational Research
Azim et al. (1989)	Computers & Industrial Engineering
Frieze; Yadegar (1989)	European Journal of Operational Research
Hariri; Potts (1989)	European Journal of Operational Research
Osman; Potts (1989)	Omega
Potts; Baker (1989)	Operations Research Letters
Daniels; Chambers (1990)	Naval Research Logistics
Ewacha et al. (1990)	Operations Research
Matsuo (1990)	Naval Research Logistics
Rajendran; Chaudhuri (1990)	Naval Research Logistics
Taillard (1990)	European Journal of Operational Research
Ho; Chang (1991)	European Journal of Operational Research
Wemmerlöv; Vakharia (1991)	I I E Transactions
Hunsucker; Shah (1992)	Omega
Rajendran; Chaudhuri (1992)	European Journal of Operational Research
Simons (1992)	Omega
Daniels; Mazzola (1993)	Annals of Operations Research
Karabati; Kouvelis (1993)	Naval Research Logistics
Lee et al. (1993)	Management Science
Rajendran (1993)	International Journal of Production Economics
Sarin; Lefoka (1993)	Omega
Tsubone et al. (1993)	Omega
Vempati et al. (1993)	Computers & Industrial Engineering
Wagneur; Sriskandarajah (1993)	Naval Research Logistics
Daniels; Mazzola (1994)	Operations Research
Gangadharan; Rajendran (1994)	Computers & Industrial Engineering
Gim et al. (1994)	Computers & Industrial Engineering
Gupta; Tunc (1994)	European Journal of Operational Research
Lim; McMahon (1994)	European Journal of Operational Research
Baker (1995)	Annals of Operations Research
Caffrey; Hitchings (1995)	International Journal of Operations & Production Management
Ching-Jong Liao et al. (1995)	Computers & Operations Research
Ishibuchi et al. (1995)	European Journal of Operational Research
Kim (1995)	European Journal of Operational Research
Raman (1995)	Journal of Operations Management

QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (continuação)

Zegordi et al. (1995)	European Journal of Operational Research
Allahverdi; Tatari (1996)	Computers & Industrial Engineering
Chen et al. (1996)	Computers & Industrial Engineering
Della Croce et al. (1996)	European Journal of Operational Research
Glass; Potts (1996)	Annals of Operations Research
Nagar et al. (1996)	Annals of Operations Research
Nowicki; Smutnicki, Czesław (1996)	European Journal of Operational Research
Ramalhinho Lourenço (1996)	European Journal of Operational Research
Kim et al. (1997)	Omega
Levner et al. (1997)	European Journal of Operational Research
Rajendran; Ziegler (1997)	Computers & Industrial Engineering
Ben-Daya; Al-Fawzan (1998)	European Journal of Operational Research
Chen; Steiner (1998)	I I E Transactions
Jia (1998)	Operations Research Letters
Portmann et al. (1998)	European Journal of Operational Research
Shakhlevich et al. (1998)	Journal of Scheduling
Allahverdi (1999)	European Journal of Operational Research
Armentano; Ronconi (1999)	Computers & Operations Research
Averbakh; Berman (1999)	Operations Research
Cheng; Shakhlevich (1999)	Journal of Scheduling
Espinouse et al. (1999)	Computers & Industrial Engineering
Rios-Mercado; Bard (1999)	I I E Transactions
Cheng et al. (2000)	Production and Operations Management
Della Croce et al. (2000)	European Journal of Operational Research
Hong; Wang (2000)	Information Sciences
Koulamas; Kyparisis (2000)	Naval Research Logistics
Moursli; Pochet (2000)	International Journal of Production Economics
Sidney et al. (2000)	Operations Research Letters
Suliman (2000)	International Journal of Production Economics
Allahverdi; Savsar (2001)	Computers & Industrial Engineering
Azizoğlu et al. (2001)	European Journal of Operational Research
Néron et al. (2001)	Omega
Soewandi; Elmaghraby (2001)	I I E Transactions
Yokoyama (2001)	International Journal of Production Economics
Alcaide et al. (2002)	European Journal of Operational Research
Čepeck et al. (2002)	European Journal of Operational Research
Chung et al. (2002)	International Journal of Production Economics
Della Croce et al. (2002)	European Journal of Operational Research
Framinan et al. (2002)	European Journal of Operational Research
Sung; Kim (2002)	Computers & Operations Research
T'kindt et al. (2002)	European Journal of Operational Research
Allahverdi; Sotskov (2003)	International Transactions in Operational Research
Bulfin; M'Hallah (2003)	Computers & Operations Research
Hou; Hoogeveen (2003)	Operations Research Letters
Oğuz et al. (2003)	European Journal of Operational Research

QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (continuação)

Rajendran; Ziegler (2003)	European Journal of Operational Research
Saadani et al. (2003)	Computers & Industrial Engineering
Daniels et al. (2004)	Management Science
Gupta et al. (2004)	Annals of Operations Research
Haq et al. (2004)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Huq et al. (2004)	Omega
Ng; Kovalyov (2004)	Naval Research Logistics
Tseng et al. (2004)	Omega
Yeung et al. (2004)	International Journal of Production Economics
Błażewicz et al. (2005)	European Journal of Operational Research
Bouquard et al. (2005)	Operations Research Letters
Grabowski; Pempera (2005)	Computers & Operations Research
Kalczynski; Kamburowski (2005)	Computers & Industrial Engineering
Low (2005)	Computers & Operations Research
Rajendran; Ziegler (2005)	Computers & Industrial Engineering
Ravindran et al. (2005)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Ronconi (2005)	Annals of Operations Research
Wang et al. (2005)	Operations Research Letters
Averbakh (2006)	European Journal of Operational Research
Chen (2006)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Chung et al. (2006)	European Journal of Operational Research
Eren; Güner (2006)	Applied Mathematics and Computation
Jin et al. (2006)	International Journal of Production Economics
Kalczynski; Kamburowski (2006)	European Journal of Operational Research
Liu, B. et al. (2006)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Grabowski; Pempera (2007)	Omega
Jin et al. (2007)	I I E Transactions
Kalczynski; Kamburowski (2007b)	European Journal of Operational Research
Kalczynski; Kamburowski (2007a)	Omega
Wang; Cheng (2007)	Computers & Operations Research
Wang; Edwin Cheng (2007)	Computers & Operations Research
Chen; Pan; Lin (2008)	Expert Systems with Applications
Chen; Pan; Wu (2008)	Expert Systems with Applications
Fondrevelle et al. (2008)	International Journal of Production Economics
Pan et al. (2008)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Paternina-Arboleda et al. (2008)	Annals of Operations Research
Shiau et al. (2008)	Expert Systems with Applications
Yang; Hsu; et al. (2008)	Computers & Operations Research
Yang; Kuo; et al. (2008)	European Journal of Operational Research
Al-Anzi; Allahverdi (2009)	Computers & Operations Research
Chandra et al. (2009)	International Journal of Production Research
Choi; Lee (2009)	Computers & Industrial Engineering

QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (continuação)

Choi; Kim (2009)	European Journal of Operational Research
Davoudpour; Ashrafi (2009)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Figielska (2009)	Computers & Industrial Engineering
Ronconi; Henriques (2009)	Omega
Czapiński (2010)	Computers & Industrial Engineering
Easwaran et al. (2010)	Applied Mathematics and Computation
Gong et al. (2010)	Computers & Operations Research
Lee et al. (2010)	International Journal of Production Economics
Liang et al. (2010)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Liao; Huang (2010)	Applied Mathematics and Computation
Mosheiov; Sarig (2010)	European Journal of Operational Research
Naderi; Tavakkoli-Moghaddam; et al. (2010)	Knowledge-Based Systems
Ng et al. (2010)	Computers & Operations Research
Behnamian; Fatemi Ghomi (2011)	Applied Mathematical Modelling
Behnamian; Zandieh (2011)	Expert Systems with Applications
Engin et al. (2011)	Applied Soft Computing
Gao et al. (2011)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Gong; Tang (2011)	Computers & Operations Research
Lee et al. (2011)	Computers & Operations Research
Li et al. (2011)	Computers & Industrial Engineering
Ng et al. (2011)	Computers & Industrial Engineering
Ribas et al. (2011)	Omega
Ahmadizar (2012)	Computers & Industrial Engineering
Aydilek; Allahverdi (2012)	Applied Mathematics and Computation
Cheng et al. (2012)	Computers & Operations Research
Chiou et al. (2012)	Expert Systems with Applications
Deng; Gu (2012)	Computers & Operations Research
El-Bouri (2012)	Computers & Operations Research
Javadian et al. (2012)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Liao et al. (2012)	Applied Soft Computing
Mehta et al. (2012)	Computers & Operations Research
Mosheiov; Oron (2012)	Computers & Operations Research
Shabtay; Gasper (2012)	Computers & Operations Research
Wang, C. et al. (2012)	Computers & Operations Research
Almeder; Hartl (2013)	International Journal of Production Economics
Aydilek; Allahverdi (2013)	Applied Mathematical Modelling
Bochtis et al. (2013)	Computers and Eletronics in Agriculture
Božejko et al. (2013)	Computers & Industrial Engineering
Chou (2013)	International Journal of Production Economics
Chung; Liao (2013)	Applied Soft Computing
Dong et al. (2013)	Computers & Operations Research
Elalouf et al. (2013)	Journal of Scheduling

QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (continuação)

Elyasi; Salmasi (2013)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Gao et al. (2013)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Gerstl; Mosheiov (2013)	International Journal of Production Economics
Chang et al. (2013)	International Journal of Production Economics
Lin et al. (2013)	International Journal of Production Economics
Lin; Ying (2013)	Omega
Liu et al. (2013)	Computers & Operations Research
Moslehi; Khorasanian (2013)	Computers & Operations Research
Wang; Wang (2013)	Computers & Operations Research
Xu et al. (2013)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Ziaee (2013)	Information Sciences
Akhshabi et al. (2014)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Benavides et al. (2014)	European Journal of Operational Research
Cheng et al. (2014)	European Journal of Operational Research
Della Croce et al. (2014)	Annals of Operations Research
Fernandez-Viagas; Framinan (2014)	Computers & Operations Research
Gerstl; Mosheiov (2014)	International Journal of Production Economics
Jeong; Kim (2014)	Computers & Operations Research
Karimi; Davoudpour (2014)	Computers & Operations Research
Laha; Sapkal (2014)	Computers & Industrial Engineering
Lee (2014)	Omega
Liu; Lu (2014)	Computers & Operations Research
Mao et al. (2014)	European Journal of Operational Research
Moslehi; Khorasanian (2014)	Computers & Operations Research
Naderi; Gohari; et al. (2014)	Applied Mathematical Modelling
Naderi; Ruiz (2014)	European Journal of Operational Research
Nagano et al. (2014)	Expert Systems with Applications
Pan; Ruiz (2014)	Omega
Shabtay et al. (2014)	Omega
Wang; Choi (2014)	Computers & Operations Research
Xu et al. (2014)	Applied Soft Computing
Chen et al. (2015)	Applied Soft Computing
Dasgupta; Das (2015)	Computers & Operations Research
Dong et al. (2015)	Computers & Operations Research
Fernandez-Viagas; Framinan (2015a)	Computers & Operations Research
Fernandez-Viagas; Framinan (2015b)	Computers & Operations Research
Framinan; Perez-Gonzalez (2015)	European Journal of Operational Research
Lei (2015a)	Computers & Industrial Engineering
Lei (2015b)	Applied Soft Computing
Lin et al. (2015)	Computers & Industrial Engineering
Liou; Hsieh (2015)	International Journal of Production Economics
Ribas; Companys (2015)	Computers & Industrial Engineering
Samarghandi (2015)	International Journal of Production Research

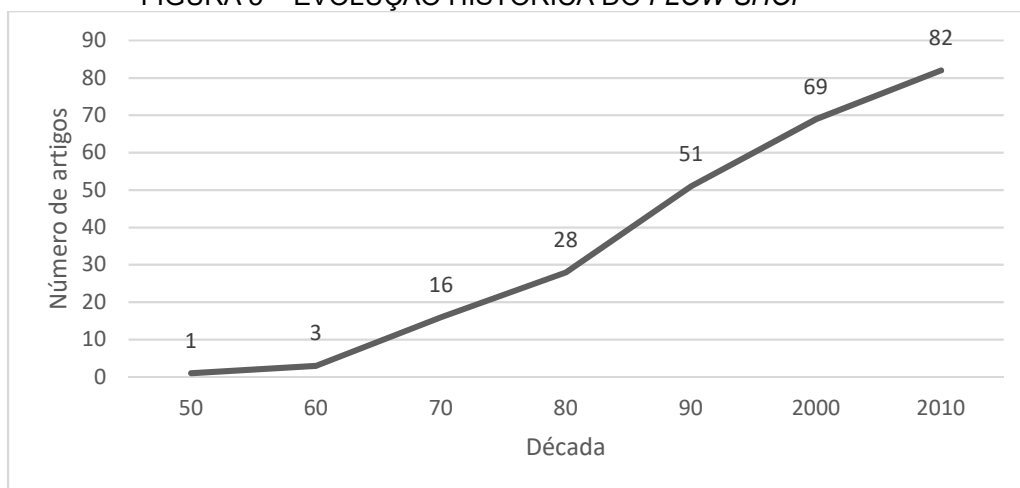
QUADRO 1 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *FLOW SHOP* (conclusão)

Yang (2015)	Computers & Operations Research
-------------	---------------------------------

FONTE: O Autor (2016).

5.1 ANO

A presente seção tem como ponto fulcral representar a evolução histórica, no que concerne à quantidade de artigos tangentes ao *Flow Shop*, ao longo dos sessenta anos de estudo da temática. A Figura 5 apresenta graficamente, década a década, essa evolução.

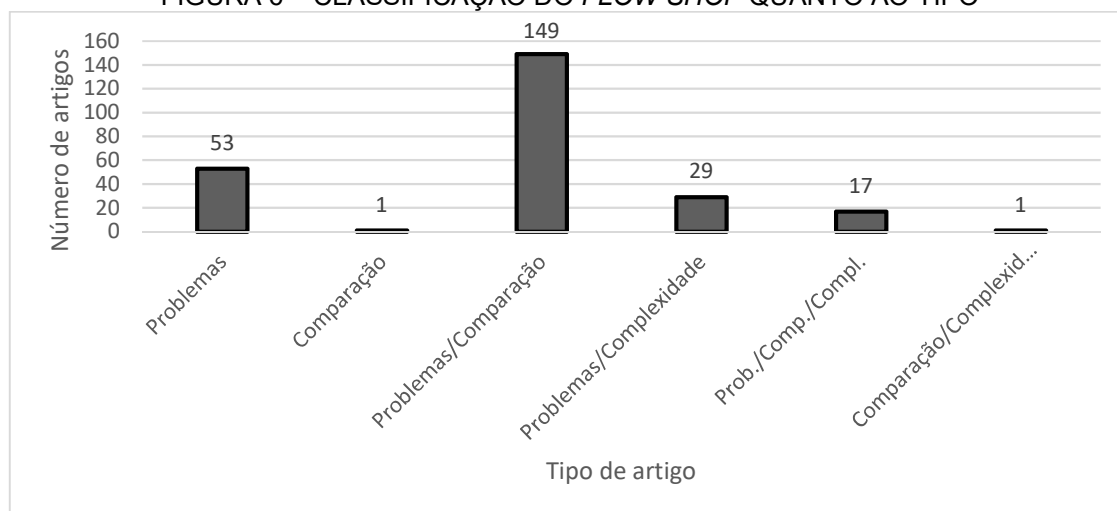
FIGURA 5 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO *FLOW SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

A Figura 5 mostra que a temática vivenciou, especialmente nos últimos quarenta anos, pronunciado crescimento, pois nesse período o número de artigos em revistas de alto impacto praticamente triplicou. Nota-se também que nesta década, ainda inconclusa, a produção acadêmica respectiva a esse ambiente fabril é significativa, posto que a quantidade de artigos verificada entre 2010 e 2015 supera o total publicado durante toda a década passada.

5.2 TIPO

No que concerne ao tipo de artigo, foram utilizadas seis categorias para classificar os duzentos e cinquenta artigos avaliados pela presente revisão. Estas categorias estão representadas na Figura 6.

FIGURA 6 – CLASSIFICAÇÃO DO *FLOW SHOP* QUANTO AO TIPO

FONTE: O Autor (2016).

Dentre as classificações utilizadas, nota-se que os artigos tipificados na categoria problemas/comparação são aqueles encontrados em maior número, com cento e quarenta e nove publicações. Dentre esses artigos, se pode citar o artigo de Dannenbring (1977), que propôs quatro heurísticas para problemas de *Flow Shop*, comparando os resultados obtidos com estas com as demais heurísticas de eficiência comprovada existentes à época, como a heurística de Palmer e a heurística CDS (Campbell, Dudek e Smith).

No extremo oposto estão os estudos exclusivamente comparativos e aqueles tipificados na categoria comparação/complexidade, com apenas uma publicação de cada tipo. No tangente à primeira, tem-se o artigo de Turner e Booth (1987), em que faz-se um estudo comparativo no que diz respeito às heurísticas utilizadas no *Flow Shop*. Nesse estudo, os autores compararam os resultados encontrados pela heurística DES de Dannenbring (1977) com a heurística NEH, de Nawaz, Ensore e Ham (1983), em termos da minimização do *makespan* e do tempo computacional despendido, em problemas de até 25 itens e 50 máquinas. Em ambos os indicadores de desempenho, a NEH se provou superior à DES.

Em relação à segunda tem-se o estudo de Tseng et al. (2004), em que realiza-se uma análise empírica de formulações de programação inteira para os problemas de *Flow Shop* Permutacional. Nessa análise, os pesquisadores avaliaram quatro modelagens matemáticas, comparando-as no que concerne à complexidade de tais modelos, a partir da quantificação do número de variáveis contínuas, binárias e restrições de cada problema. Além disso, faz-se considerações e estudos acerca dos

tempos computacionais que cada modelo despende na resolução de 60 problemas de *Flow Shop* Permutacional com o objetivo de minimizar o *makespan*, com até nove itens e nove máquinas.

No que diz respeito aos artigos categorizados de modo conjunto em problemas/comparação/complexidade, encontram-se na presente análise dezessete estudos com essa especificidade. Dentre esses estudos, o artigo de Szwarc e Gupta (1987) é um exemplo de tal tipificação. Neste trabalho, os autores estudam o *Flow Shop* com *setup* dependente da sequência, comparando os modelos propostos por eles, com aquele desenvolvido por Sule (1982), em termos do percentual de desvio da solução obtida pelos primeiros em relação ao último. Além disso, são feitas considerações a respeito da complexidade do problema proposto, classificada pelos autores como NP-completo.

Em uma escala intermediária estão os estudos classificados em problemas/complexidade, com vinte e nove publicações e os estudos que se detiveram exclusivamente aos problemas específicos, com cinquenta e três artigos. No que concerne ao primeiro, tem-se o artigo de Levner et al. (1997) que trata do *Flow Shop* cíclico (ou periódico), em que se o comportamento de um robô que transporta peças em uma linha automatizada de manufatura de placas de circuito impresso. O objetivo aqui é encontrar uma sequência que minimize o tempo de ciclo desse autômato.

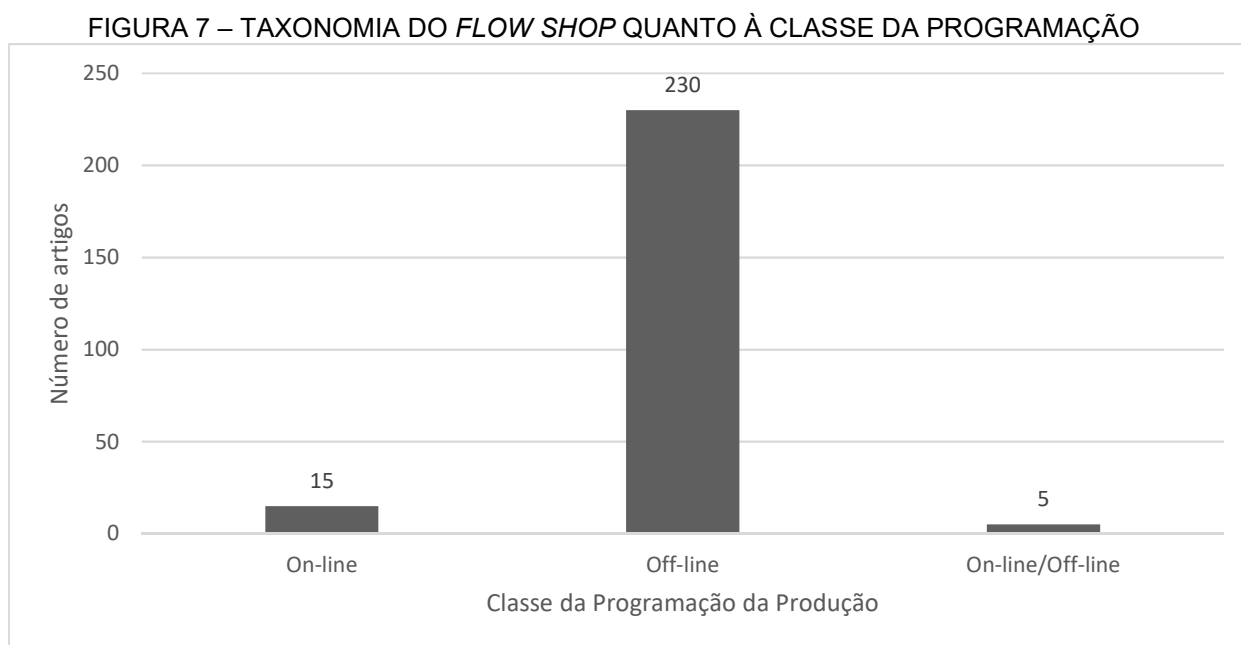
No tangente ao segundo, se pode citar o artigo de Huq et al. (2004), em que se elabora um estudo de caso em uma seguradora. Nesse trabalho, há a possibilidade de mais de um operador trabalhar na mesma estação de trabalho. Para reduzir o tempo ocioso das máquinas, a empresa faz um fracionamento dos lotes (*lot streaming*), fazendo com que os itens cheguem mais rápido às máquinas a jusante da cadeia de processamento. Os objetivos do trabalho dos autores são a minimização do *makespan* e a determinação do tamanho da força de trabalho e a alocação ótima desta.

Em suma, à luz dessa métrica, verifica-se que os artigos que se detem à análise de uma característica exclusiva são encontrados em menor quantidade, se compararmos estes àqueles que se dedicam ao estudo conjunto das classificações aqui apresentadas. De modo geral, os artigos categorizados em

problemas/comparação se valem de instâncias consagradas na literatura para a validação dos métodos pelos autores propostos, ou modificações realizadas em metodologias preexistentes.

5.3 CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Nessa métrica os artigos são categorizados em *off-line*, *on-line*, quando o artigo trata apenas de uma classe de Programação da Produção; e *off-line/on-line*, quando o estudo analisado se propôs ao estudo comparativo das duas classes. Os resultados concernentes à quantidade de artigos publicados em cada uma das categorias acima apresentadas estão retratados na Figura 7.



FONTE: O Autor (2016).

No que diz respeito aos resultados referentes a esta métrica, é notória a quantidade pronunciada de publicações que se detiveram ao estudo do *Flow Shop off-line*, com duzentas e trinta das duzentas e cinquenta publicações contidas no escopo da presente revisão. Dentre esses artigos, tem-se o de Frieze e Yadegar (1989), que propõem uma nova formulação de programação inteira para o problema de *Flow Shop* Permutacional.

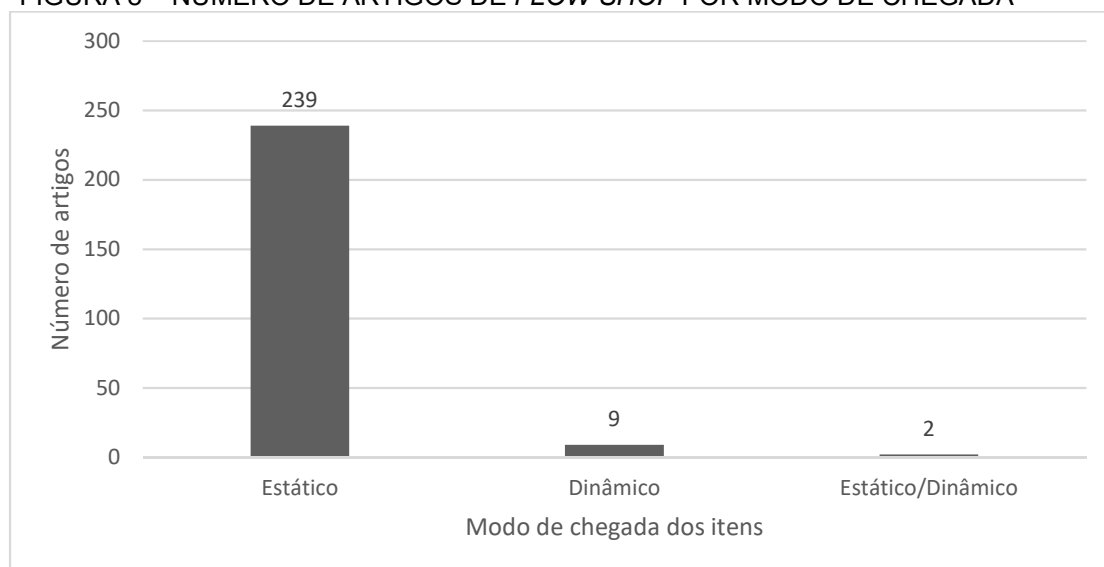
Em relação às demais classes, há que se mencionar de maneira mais pormenorizada os estudos abrangidos nestas. No que tange aos trabalhos que se detiveram ao estudo *Flow Shop online*, há apenas quinze artigos aqui classificados. Dentre estes, destaca-se o artigo de Allahverdi e Sotskov (2003), que trabalharam o *Flow Shop* com duas máquinas, em que os tempos de processamento propriamente ditos não são conhecidos até que se complete a operação. Os autores determinam apenas os limites superior e inferior desses tempos.

No que diz respeito aos estudos que trabalharam de modo conjunto com a classe *off-line* e a classe *on-line* da Programação da Produção (cinco dos duzentos e cinquenta), destaca-se o artigo de Davoudpour e Ashrafi (2009). Neste trabalho, dados como as datas de liberação dos itens são conhecidos *à priori*, enquanto o tempo de processamento de um item é uma função linear da quantidade de recurso alocada a ele, o que faz com que a duração da atividade seja ignota até o término da operação.

A partir dessas análises se pode verificar que o campo da Programação da Produção em *Flow Shop on-line* e análise conjunta das duas classes, são ainda pouco explorados. Pode-se afirmar que demandam maior atenção por parte da academia, configurando-se desse modo em ambientes frutíferos à prospecção de futuras pesquisas acerca da temática.

5.4 MODO DE CHEGADA DOS ITENS

No que concerne ao modo de chegada dos itens, os artigos são categorizados em estático e dinâmico. Quando o artigo estudado faz considerações acerca dos dois modos de chegada dos itens, o mesmo é categorizado como estático/dinâmico. Os resultados respectivos a essa métrica são apresentados na Figura 8.

FIGURA 8 – NÚMERO DE ARTIGOS DE *FLOW SHOP* POR MODO DE CHEGADA

FONTE: O Autor (2016).

Tangente aos resultados encontrados ao se proceder a análise dessa métrica, verifica-se a notória e pronunciada quantidade de artigos de *Flow Shop* estáticos, com duzentos e trinta e nove dos duzentos e cinquenta artigos avaliados presentes nessa categoria de modo de chegada dos itens. Dentre estes, se pode citar o artigo de Hariri e Potts (1989) que propuseram a utilização do *Branch and Bound* em problemas de *Flow Shop* Permutacional, visando à minimização do número de itens atrasados.

Em relação aos demais estratos analisados, tem-se apenas dois artigos que tratam de ambos os modos de chegada de itens. O primeiro, de autoria de Tsubone et al. (1993), trata de um estudo de caso em uma fábrica de filmes fotográficos, utilizados nas artes gráficas e na medicina. Os autores definem o ambiente estudado como majoritariamente estático, mas existe a possibilidade de atender a pedidos urgentes.

O segundo, cuja autoria é de Chou (2013), trata da possibilidade do adiamento do processamento de alguns itens, mantendo a programação original dos demais. Esse trabalho é desenvolvido em um *Flow Shop* híbrido com múltiplos estágios. O problema dos autores tem duas decisões fundamentais associadas, que influenciam no desempenho do método resolutivo: o sequenciamento dos itens no estágio 1 e a alocação dos itens às máquinas nos estágios subsequentes.

No que concerne aos estudos que trataram do *Flow Shop* dinâmico, destaca-se o artigo de Wemmerlöv e Vakharia (1991), em que quatro regras de

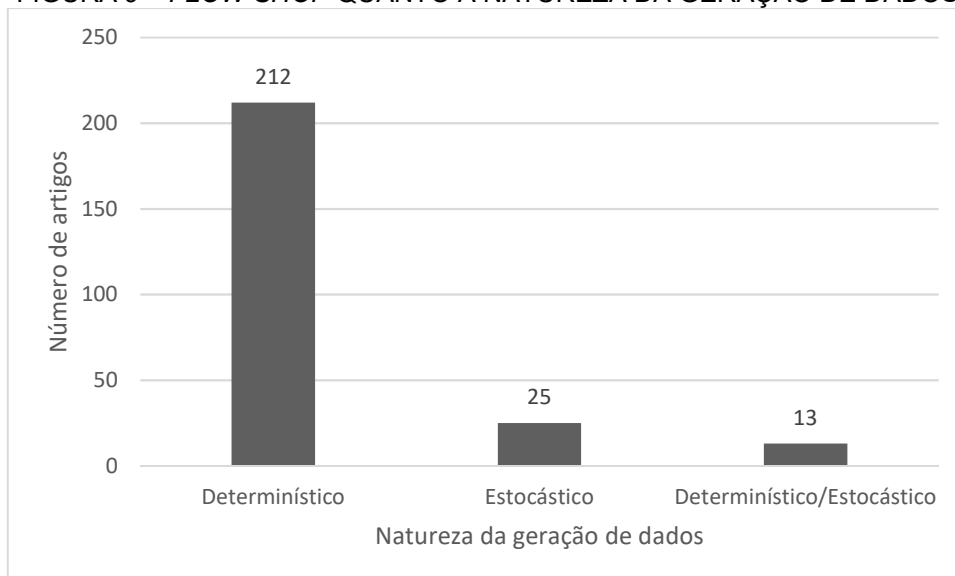
sequeenciamento estáticas são aplicadas em um ambiente dinâmico por meio de uma simulação realizada em uma linha de produção com estoques intermediários infinitos. Nesta simulação tem-se como decisões importantes a ser tomadas são a escolha do intervalo de ressequenciamento e o limite do conjunto de itens

Assim como no caso das classes de Programação da Produção, em que o *Flow Shop online* é pouco explorado, nota-se no que tange ao modo de chegada dos itens que as pesquisas concernentes ao *Flow Shop* dinâmico e ao estudo conjunto destes ainda carecem de um maior número de publicações, o que pode ser um campo profícuo para trabalhos futuros.

5.5 NATUREZA DA GERAÇÃO DOS DADOS

Em relação à natureza dos dados, os artigos pertencentes ao escopo da presente revisão foram classificados entre aqueles que versam acerca do *Flow Shop* determinístico, aqueles que tratam da temática do *Flow Shop* estocástico e aqueles em que há a presença tanto de dados determinísticos como de estocásticos. Os resultados tangentes à quantidade de artigos publicados à luz das categorias presentes nessa métrica são apresentados na Figura 9 .

FIGURA 9 – *FLOW SHOP* QUANTO À NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS



FONTE: O Autor (2016).

Conforme verificado acima, tem-se a prevalência dos estudos determinísticos face às demais categorizações, pouco exploradas na esfera acadêmica. Destes, os estudos que trabalham com um conjunto híbrido de dados são os que aparecem em menor quantidade, com apenas 13 dos 250 artigos .

No que concerne aos trabalhos correlatos ao *Flow Shop* estocástico, são ao todo vinte e cinco aqui categorizados. São exemplos de artigos que trataram dessa temática os estudos de Cunningham e Dutta (1973) e Forst (1983), que utilizaram tempos de processamento exponencialmente distribuídos para problemas com duas máquinas; Kalczynski e Kamburowski (2006), que fizeram uso de tempos de processamento que seguiam uma distribuição Weibull. Nesse trabalho, o objetivo é a minimização do makespan esperado; Framinan e Perez-Gonzalez utilizaram em seus testes dados que seguiam uma distribuição lognormal, entre outros.

No que diz respeito aos estudos afins à temática do *Flow Shop* determinístico (212 dos 250), são exemplos desse tipo de trabalho os artigos de Burns e Rooker (1975) e Moslehi e Khorasanian (2014). O primeiro resolve um pequeno problema com três máquinas e três itens, enquanto o segundo se vale das instâncias de Taillard para comprovar a eficiência da metodologia pelos autores proposta.

Em relação aos artigos que compreendem um conjunto híbrido de dados, destaca-se o estudo de Elyasi e Salmasi (2013). Neste trabalho, os tempos de processamento são determinísticos, enquanto as datas de entrega dos itens são estocásticas e seguem uma distribuição normal.

Em relação a essa métrica, constata-se que o campo de estudo respectivo ao conjunto híbrido de dados é o mais inexplorado, o que pode ser uma prolífica temática a ser estudada em pesquisas futuras.

5.6 CARACTERÍSTICA DOS ITENS

A partir desse tomo da revisão sistemática, os artigos serão avaliados década a década. Por conta do menor número de artigos das três primeiras décadas analisadas no estudo, decidiu-se reuni-las e detalhá-las de modo conjunto. Desse modo, as publicações foram divididas em cinco estratos temporais, quais sejam: Primeiro Período, compreendido entre 1954 e 1979; Segundo Período, entre 1980 e

Na Figura 10, nota-se a predominância do modelo clássico (10 de 20 artigos usaram esse modelo), face às demais características. São exemplos de artigos que tratam do modelo clássico os estudos de Panwalkar e Khan (1975), em que se resolveram problemas de até doze itens e dez máquinas e Gupta (1975) – Gupta(3) na rede – que trabalhou com problemas de até seis itens e seis máquinas, em que se comparou os resultados encontrados por meio da busca lexicográfica por ele proposta, face àqueles obtidos por meio de enumeração completa.

Além do modelo clássico, outras características são encontradas na rede, como tempos de processamento ordenados, sem espera, *setup* dependente da sequência, entre outros.

No tangente aos tempos de processamento ordenados, tem-se três artigos que tratam da temática, Smith et al. (1975), Smith et al. (1977) e Panwalkar e Khan (1977). Problemas com essa característica tem dois atributos que os distingue dos demais. O primeiro deles tem a ver com a relação entre todos os itens desse problema: se um determinado item tem um tempo de processamento menor em qualquer máquina do que um outro item, então o tempo de processamento do item anterior será menor ou igual ao tempo de processamento deste último em todas as máquinas correspondentes. O segundo é respectivo à relação entre todas as máquinas do problema: a máquina com o menor tempo de processamento para um dado item também terá o menor tempo de processamento dos demais itens.

No que diz respeito aos problemas de *Flow Shop* sem espera, tem-se dois artigos que se detiveram a essa temática, que são os artigos de Van Deman e Baker (1974) e Gupta (1976). O primeiro estuda essa característica visando à minimização do tempo médio de fluxo, enquanto o segundo procura minimizar a soma ponderada do tempo total de ociosidade das estações de trabalho.

No tangente ao *setup* dependente da sequência, o trabalho de Corwin e Esogbue (1974) aborda esse assunto num problema com duas máquinas, mas com o tempo de preparação dependente da sequência em apenas uma das máquinas. Para tal, os autores elabora duas variantes do problema, DI (primeira máquina com *setup* dependente e segunda com independente) e ID, que é o inverso da primeira.

Ao fim da análise dessa primeira década há que se destacar o trabalho de Sahney (1971), que aborda quatro características em seu artigo. Nesse artigo, o autor aborda questões correlatas à possibilidade de interrupção do processamento dos itens, tempos de transferência do operador, que é único em relação às estações de trabalho, que são duas e a possibilidade de inserir tempo ocioso, mesmo quando há itens esperando pelo processamento naquela máquina.

5.6.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Se nos primeiros vinte e cinco anos de análise encontrou-se vinte artigos pertencentes ao escopo da presente dissertação, apenas nesse período 1980 são vinte e oito publicações de *Flow Shop*. Nessa década, constata-se a presença de uma maior gama de características estudadas. A Figura 11 traz esse panorama.

Assim como no período predecessor, a predominância de problemas clássicos persiste. Exemplos de trabalhos que contribuíram nesse tocante são os artigos de Szwarc (1981) e Azim (1989). No primeiro, expõe-se condições necessárias e suficientes para que se atinja a otimalidade na resolução do problema estudado. No segundo se trabalha com o conceito de programações antitéticas, isto é, estuda-se a variação do resultado provocada pela reversão da sequência.

Dentre as características estudadas a partir dessa década, indubitavelmente, a que se tornou mais relevante dentro do estudo de *Flow Shop* foi o caráter permutacional das sequências, isto é, além do fluxo ser o mesmo para todos os itens, a ordem em que os itens passam é a mesma para todas as máquinas. Essa hipótese simplificadora reduz drasticamente o espaço de soluções e, por conseguinte, a complexidade do problema. São trabalhos que contemplaram essa característica as publicações de Potts (1980), Adiri e Frostig (1984), entre outros.

Outras características foram pela primeira vez estudadas nessa década, como por exemplo, o bloqueio, em Pinedo (1982), Foley e Suresh (1984) e Foley e Suresh (1986); problemas sem tempo ocioso, em que a máquina é continuamente utilizada, presente nos estudos de Adiri e Pohoryles (1982), que também trabalharam com o caráter sem espera no modelo e Woolam (1986); as datas de entrega, abordadas por Boxma e Forst (1986) e Hariri e Potts (1989). No primeiro, as datas de entrega eram estocásticas, enquanto no segundo, determinísticas.

5.6.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Nessa década foram publicados 51 dos 250 artigos por essa dissertação analisados. Nesse período, quarenta e duas características foram estudadas e questões concernentes ao *setup* foram mais bem contempladas nos artigos contidos nesse estrato temporal, em que os resultados estão retratados na Figura 12 .

FIGURA 12 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2016).

No tangente a esse período, os problemas clássicos, como os verificados nos estudos de Taillard (1990), Vempati et al. (1993) e Zegordi et al. (1995), continuam a ser os mais estudados. Ao todo, são 16 dos 51 artigos que trataram de maneira exclusiva tal atributo.

Os modelos permutacionais continuam a ter relevância dentro do estudo de *Flow Shop*, conforme é verificado nos artigos de Ewacha et al. (1990), Karabati e Kouvellis (1993), Rios-Mercado e Bard (1999), entre outros.

Duas características que cresceram em importância nessa década foram as ponderações acerca do *setup* e da disponibilidade das máquinas. Em relação ao primeiro, uma série de artigos abordaram as diversas variantes presentes quando do estudo dos tempos de preparação. Simmons Jr (1992) e Rajendran e Ziegler (1997) trataram de modelos com *setups* dependentes da sequência; Chen e Steiner (1998) abordaram a questão dos tempos de preparação dependentes do item; Kim et al. (1997) estudaram a possibilidade do *setup* ser separado do processamento, ou seja, a preparação da máquina subsequente pode ser realizada antes mesmo do término do processamento do item no estágio anterior.

Em relação ao segundo, tem-se também uma diversidade de aspectos correlatos à disponibilidade das estações de trabalho. Espinouse et al. (1999) trabalharam com disponibilidade limitada da máquina, algo disposto em contrário com o que é versado nos pressupostos clássicos da Programação da Produção; Allahverdi e Tatari (1996) e Jia (1998) abordaram a questão das quebras de máquinas.

Outras características que se mantiveram presentes nas publicações dessa década foram os modelos sem espera, como os artigos de Levner (1997) e Allahverdi (1999) e as datas de entrega, presentes em Daniels e Chambers (1990) e Armentano e Ronconi (1999).

5.6.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Em relação ao Quarto Período, tem-se 69 artigos e 63 características aqui contempladas. Por conta da quantidade e diversidade de características, para que se possa ter maior entendimento e visualização das redes construídas, optou-se por

dividir essa década em dois quinquênios, sendo a parte I correspondente ao período compreendido entre 2000 e 2004 e a parte II entre 2005 e 2009.

5.6.4.1 Quarto Período – Parte I

Em relação à parte I do quarto período estudado, tem-se 32 artigos e 41 características. Como principal alteração nesse período é a menor importância relativa que os modelos clássicos passam a ter. Outro ponto relevante é a quantidade crescente de artigos que trabalham com diferentes variações correlatas aos tempos de processamento. A Figura 13 traz, de maneira gráfica, esse contexto.

FONTE: O Autor (2016).

Em relação ao período analisado, nota-se que os modelos clássicos, embora não tenham a quantidade de publicações de outrora, ainda apresentam uma contribuição passível de destaque. São artigos aqui categorizados aqueles de autoria de Koulamas e Kyparisis (2000), Azizoglu (2001), T'Kindt et al. (2002), entre outros.

No que concerne às diversas variações de abordagem correlata aos tempos de processamento, Hong e Wang (2000) trabalham com tempos de processamento difusos; Cheng et al. (2000), que tratam de tempos de processamento idênticos em uma das máquinas; Alcaide et al. (2002), que trazem a temática dos tempos de processamento aleatórios; Allahverdi e Sotskov (2003), tratam de limites para os tempos de processamento; Hou e Hoogeveen (2003) abordam os tempos de processamento ordenados; e Daniels et al. (2004), que condicionam o tempo de processamento do item à quantidade de trabalhadores treinados designados para a realização da operação.

Outras características importantes desse período são o caráter permutacional, abordado em Suliman (2000), Chung et al. (2002) e Tseng et al. (2004); e sem espera, encontrada em Moursli e Pochet (2000), Cheng et al. (2000) e Cepek et al. (2002).

5.6.4.2 Quarto Período – Parte II

No quinquênio derradeiro da década IV, a grande mudança que ocorre é a verificação de que os modelos permutacionais aparecem com maior frequência do que os modelos clássicos, algo inédito. Outro ponto de destaque desse período são os modelos de recirculação, outrora pouco presentes e nesse estrato são estudados com maior frequência que em tempos idos. A Figura 14 retrata esse período.

FONTE: O Autor (2016).

Os modelos permutacionais tem a maior quantidade de artigos publicados nesse quinquênio, com dezessete dos trinta e sete artigos abordando tal atributo. Exemplos disso são os artigos de Kalczynski e Kamburowski (2005), Averbakh (2006), entre outros.

Outro ponto relevante é a questão dos artigos que tratam da recirculação, presente em cinco das trinta e sete publicações. Chen (2006) resolveu problemas desse tipo com até sete itens e vinte máquinas; Chen, Pan e Lin (2008) abordaram a recirculação em um problema com até trinta itens, trinta máquinas e seis estágios; Chen, Pan e Wu (2008) resolveram problemas com recirculação ainda mais desafiadores. Com a utilização de meta-heurísticas híbridas, os autores resolveram de 60 itens, 60 máquinas e 3 estágios; Yang, Kuo e Chern abordaram a recirculação em um problema que continha também a questão de múltiplas famílias de itens, que serão processadas em duas máquinas; por fim, Choi e Kim (2009) propõem um modelo de recirculação em duas máquinas, considerando um item como um par de sub-itens, isto é, cada um representa uma passagem pelas duas máquinas.

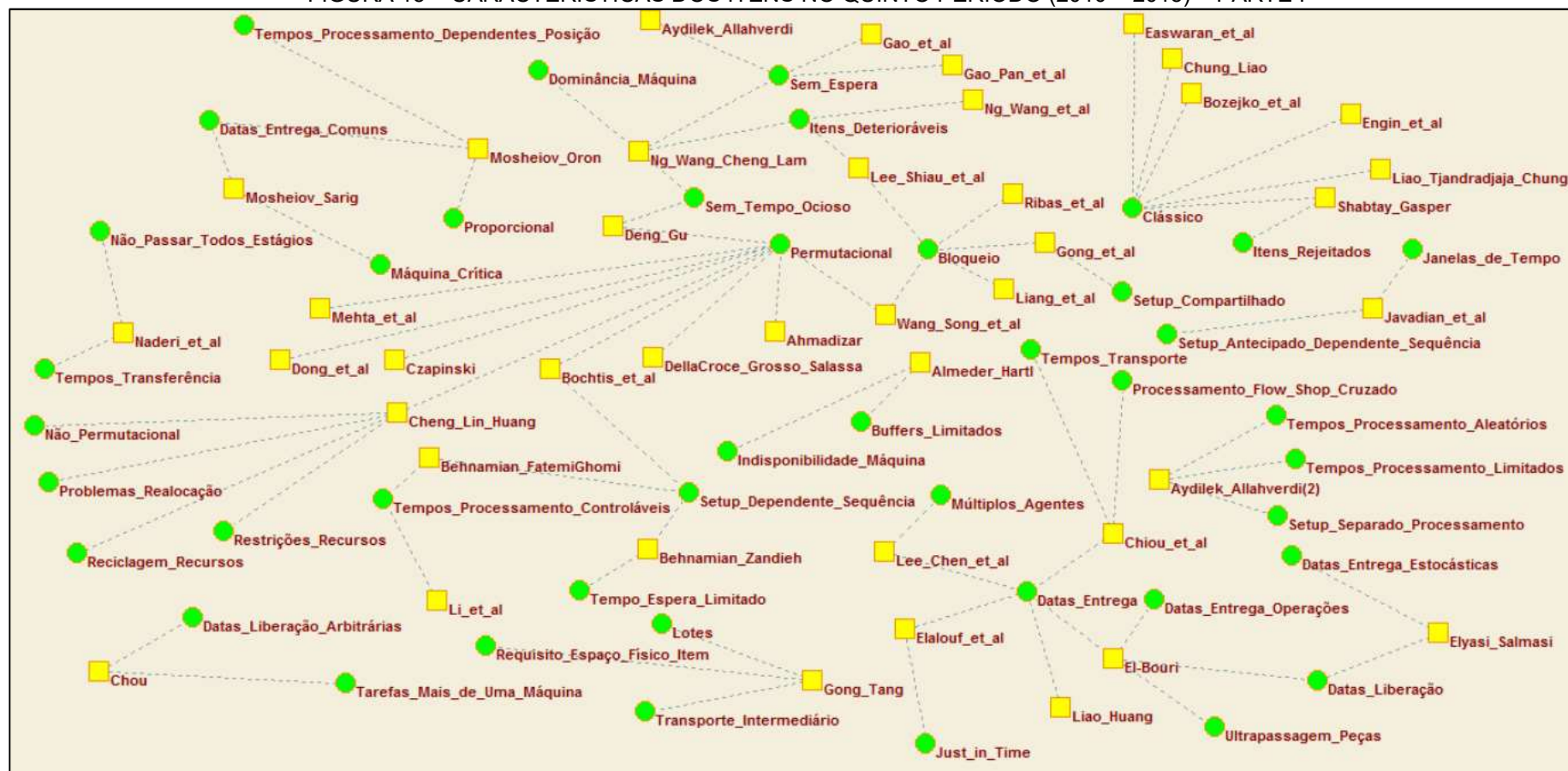
5.6.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Esse período, embora inconcluso, é a mais frutífera em termos do número de publicações e, por conseguinte, de características apresentadas. Assim como ocorreu na subseção anterior, dividiu-se a análise desse estrato temporal em duas partes: os primeiros 41 artigos correlatos ao período comporão a parte I, enquanto os 41 restantes comporão a parte 2.

5.6.5.1 Quinto Período – Parte I

Nessa primeira parte da década os modelos permutacionais e clássicos são os mais frequentes, com maior destaque para o primeiro. A Figura 15 traz esse e outros aspectos referentes ao período.

FIGURA 15 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I



FONTE: O Autor (2016).

Nesse período os 41 artigos trazem em seu bojo 43 características distintas. Destas, conforme supracitado, os modelos permutacionais e clássicos são apresentados em 15 das 41 publicações. Exemplos de modelos permutacionais são os trabalhos de Czapinski (2010), Della Croce, Grosso e Salassa (2011), entre outros. Modelos clássicos são apresentados nos estudos de Engin et al. (2011), Chung e Liao (2013), entre outros.

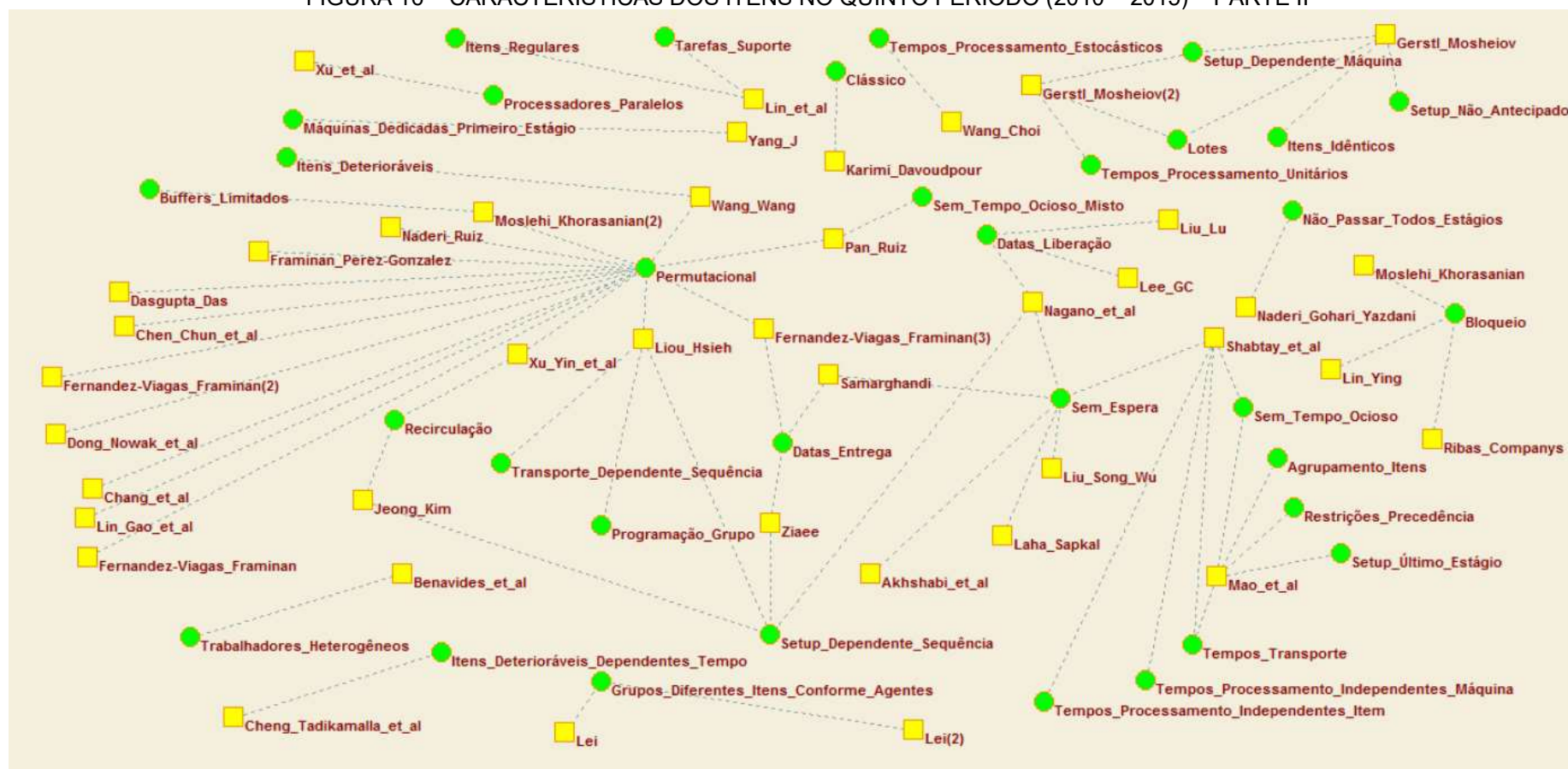
Duas características presentes nesse período e que apesar dos poucos artigos publicados tem aspectos interessantes a ser ressaltados são a reciclagem de recursos e os itens deterioráveis. A primeira, presente no trabalho de Cheng, Lin e Huang (2013), é relacionada nesse estudo ao processo de reconstrução de prédios e as decisões do modelo são referentes à otimização da sequência em que estes edifícios serão reformados, de modo que todos os inquilinos sejam acomodados nas casas temporárias ao longo do processo.

A segunda é abordada, por exemplo, em Lee et al. (2010) e se relaciona à abordagem *on-line* dos problemas de Programação da Produção, pois há situações, como em empresas laminadoras de aço, que o item quando processado mais tarde no sequenciamento leva mais tempo que esse mesmo item processado mais cedo. Portanto, o tempo de processamento é desconhecido até que este seja concluído.

5.6.5.2 Quinto Período – Parte II

Nesse período, o ponto mais destacável é a existência de apenas um artigo que contemple o modelo clássico, enquanto a soberania do modelo permutacional se consolida. Na Figura 16 tem-se a representação por meio de redes desse estrato.

FIGURA 16 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II



FONTE: O Autor (2016).

Os modelos permutacionais estão presentes em treze dos quarenta e um artigos apresentados nesse excerto da quinta década. Exemplos dessa utilização são os trabalhos de Naderi e Ruiz (2014), Dasgupta e Das (2015), entre outros.

Uma característica inédita abordada nessa década é o problema sem tempo ocioso misto, isto é, algumas máquinas tem a característica de ser utilizadas sem que haja ociosidade nelas, enquanto outras não tem que estar em contínua utilização, algo mais realístico e com implicações em indústrias como as de processamento de fibra de vidro, fundições, entre outras. O artigo de Pan e Ruiz é considerado como o introdutório nesse campo.

Em suma, ao fim dessas cinco décadas de análise, constata-se a considerável diversidade de características já abordadas na literatura. Contudo, tem-se uma dicotomia em relação à evolução do *Flow Shop* em relação a esta métrica específica: nota-se um avanço dos modelos permutacionais, que são mais simples e, que por conta disso, permite aos pesquisadores testar diversos métodos resolutivos e validá-los a partir de instâncias consagradas na literatura. Por outro lado, as demais características estudadas tem se voltado cada vez mais a problemas mais próximos do que é encontrado no ambiente fabril, como incertezas quanto aos tempos de processamento, ponderações acerca da disponibilidade e manutenibilidade das estações de trabalho, entre outros. Há que se destacar que os pontos prolíficos à pesquisa futura estão nesse segundo prisma, apesar da demasiada complexidade que tais modelos ensejam.

5.7 CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE

Em relação aos critérios de otimalidade, assim como fez-se com as características dos itens, a análise foi dividida em cinco décadas, nos moldes da divisão feita na seção anterior.

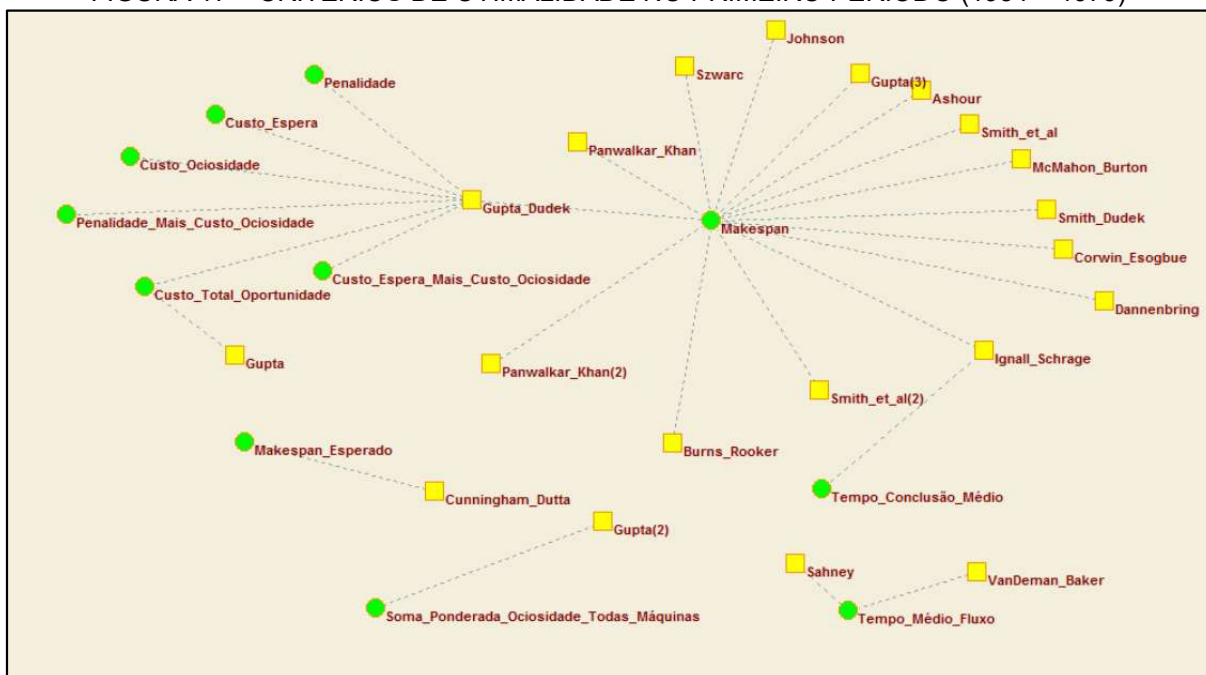
5.7.1 Primeiro Período (1954 – 1979)

Neste primeiro período, tem-se uma menor quantidade de artigos, mas nesse primeiro estrato já se identifica algo que se repete ao longo de todo o estudo dessa métrica: a pronunciada quantidade de publicações que ao menos em algum momento

de seu estudo visa à minimização do *makespan*, seja o determinístico, seja o estocástico (*makespan* esperado). A Figura 17 mostra esse predomínio

A importância gerencial da minimização do *makespan* repousa na relação que este tem com o rendimento (*throughput*) da programação ou da sequência construída. Como o *throughput* é a quantidade de tarefas concluídas por unidade de tempo, a maximização do *throughput* é obtida a partir da minimização do *makespan* (BAKER; TRIETSCH, 2009).

FIGURA 17 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

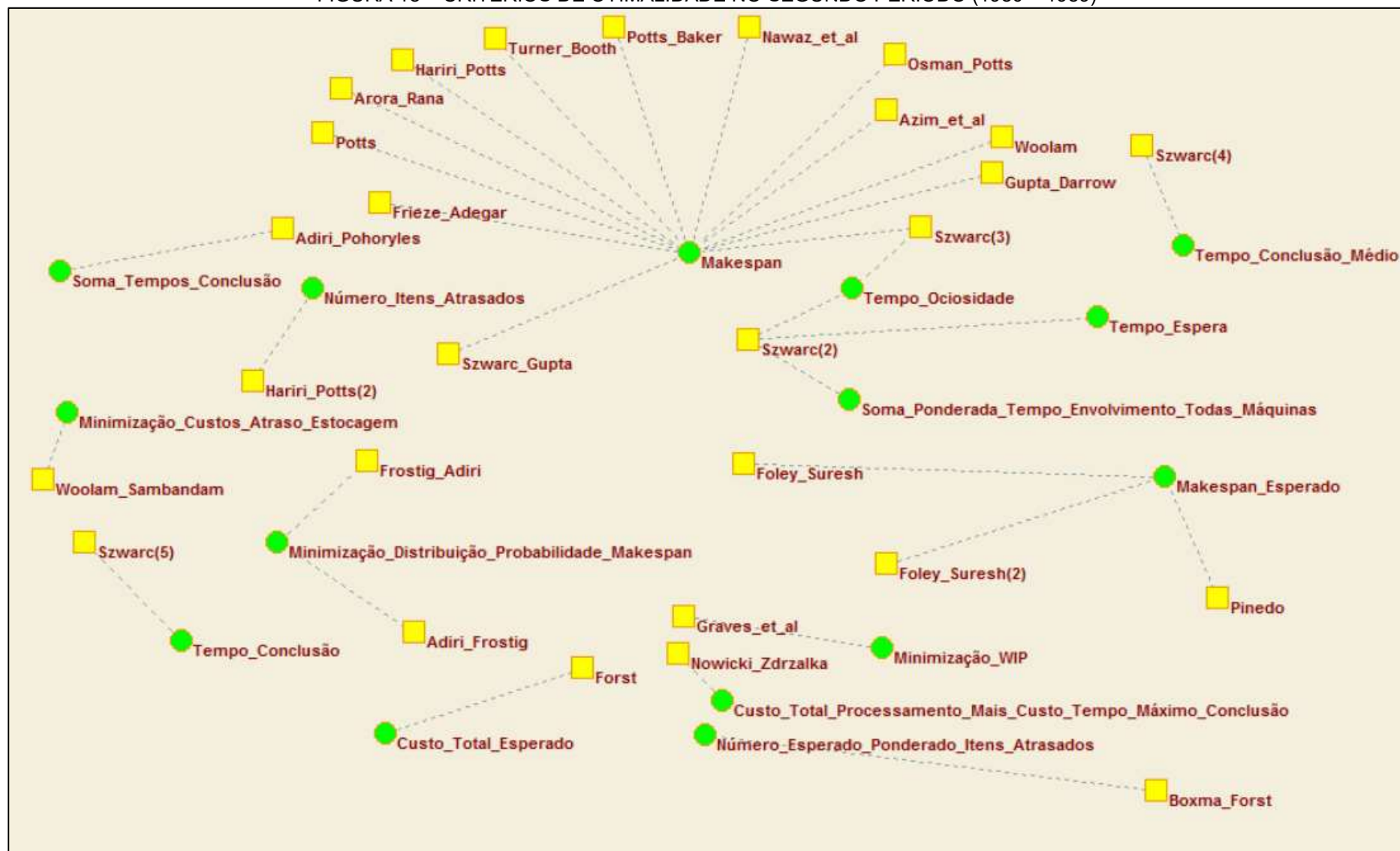
Além do *makespan*, tem-se outros objetivos trabalhados em menor quantidade pelos autores. Nesse tocante, deve-se destacar o trabalho de Gupta e Dudek (1971) que fornece a interpretação econômica dos critérios de otimalidade por eles estudados. Além disso, os autores propõem um critério de otimização global, a minimização do custo de oportunidade, que é a soma dos quatro custos de produção: operação, espera, ociosidade e penalidade por item atrasado. Os autores fazem por meio de geração de cenários a partir da criação de problemas aleatórios uma análise de sensibilidade da combinação desses critérios, ou do uso individualizado destes, ranqueando ao fim da análise quais impactam de maneira mais significativa no custo total de oportunidade.

Em relação às ponderações feitas no que concerne à ociosidade das estações de trabalho, tem-se também o artigo de Gupta (1976), que versa sobre a soma ponderada dos tempos de ociosidade das máquinas em um problema modelado para processamento contínuo do item (sem espera). Quando isso ocorre, para que se garanta continuidade, muitas vezes o início da operação é atrasado, mesmo que a máquina esteja disponível naquele momento, de modo a garantir o processamento ininterrupto do item.

5.7.2 Segundo Período (1980 – 1989)

No segundo período, além do predomínio do *makespan* determinístico, tem-se mais trabalhos preocupados com questões correlatas a custos e estocagem. Há também mais estudos focados em modelos estocásticos, visando à minimização do *makespan* esperado. A Figura 18 retrata graficamente os critérios de otimalidade estudados na segunda década.

FIGURA 18 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989)



FONTE: O Autor (2016).

Conforme exposto anteriormente, mais artigos se detiveram ao estudo dos custos. Forst (1983) trabalhou com modelos estocásticos em um problema com duas máquinas visando à minimização de uma função linear de custo total esperado. Este custo pode ser de estocagem, tempo de término, penalidade ou adiamento; Woolam e Sambandam (1985) trataram da minimização de uma função composta de custos, em que se pondera tanto os custos de estocagem, como os custos por atraso; Nowicki e Zrdzalka (1988) versam que o custo do item é uma função do linear do tempo de processamento e o que custo da programação a ser minimizado é o custo do tempo total de processamento mais o custo do *makespan*.

Em relação aos modelos que trabalham o *makespan* esperado, tem-se os artigos de Pinedo (1982), Foley e Suresh (1984) e Foley e Suresh (1986). Outros objetivos tratados nessa década incluem o número de itens atrasados, tratado de maneira não ponderada por Hariri e Potts (1989) e com a atribuição de pesos e utilização de modelo estocástico por parte de Boxma e Forst (1986); a minimização do trabalho em processo (*Work in Process – WIP*), tratada por Graves et al. (1983), entre outros.

5.7.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

O terceiro período é marcada pela introdução de modelos multiobjetivos e a maior preocupação com modelos que objetivam a minimização dos atrasos e também uma maior diversidade de objetivos. Além disso, persiste a predominância do *makespan*, face aos demais critérios. A Figura 19 expõe graficamente essas considerações.

FONTE: O Autor (2016).

Conforme supracitado, modelos multiobjetivos aparecem com maior frequência nessa década. Daniels e Chambers (1990) exploraram e quantificaram o *trade-off* entre os critérios *makespan* e atraso máximo, em problemas de até 10 máquinas e 30 itens; Nagar et al. (1996) trabalharam a soma ponderada entre dois objetivos, *makespan* e tempo médio de fluxo, utilizando uma metodologia híbrida de resolução, em um problema com duas máquinas; Cheng e Shakhlevich (1999) minimizaram o *makespan* e uma função de compressão de custo em um problema complexo, com tempos de processamento controláveis.

Em relação aos trabalhos que trataram sobre o atraso dos itens e suas diversas nuances, tem-se os artigos de Ewacha et al. (1990), Wemmerlöv e Vakharia (1991), Hunsucker e Shah (1992), entre outros. No primeiro, os autores estudam os critérios número de itens atrasados e atraso total; No segundo, tem-se como critério a razão entre número de itens adiantados e itens atrasados, explicada gerencialmente por conta de produtos que são produzidos muito antes de ser entregues implicam em custos de estocagem e produtos atrasados implicam em possível perda do cliente; e no terceiro aborda-se o número de itens atrasados e o atraso médio.

5.7.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Nesse estrato da análise tem-se como características marcantes a consolidação de modelos multiobjetivos, a introdução de outros critérios, como o desvio de pontualidade (*lateness*). A Figura 20 traz o panorama dessa década.

FONTE: O Autor (2016).

Em relação aos objetivos que foram estudados pela primeira vez nessa década tem-se o tamanho da força de trabalho, tratado no artigo de Huq et al. (2004) e o *lateness* máximo, que foi um dos objetivos trabalhado na abordagem multi critério de Al-Anzi e Allahverdi (2009).

Nessa década há que se destacar também o trabalho de Cepek et al. (2002), que aborda diversas variantes de problemas *Flow Shop*, mas de modo genérico, isto é, sem especificar um critério resolutivo. Neste artigo estuda-se a temática da dominância das máquinas, que são restrições que impõem uma espécie de ordem linear em todos os tempos de processamento dependendo da sequência tecnológica das máquinas.

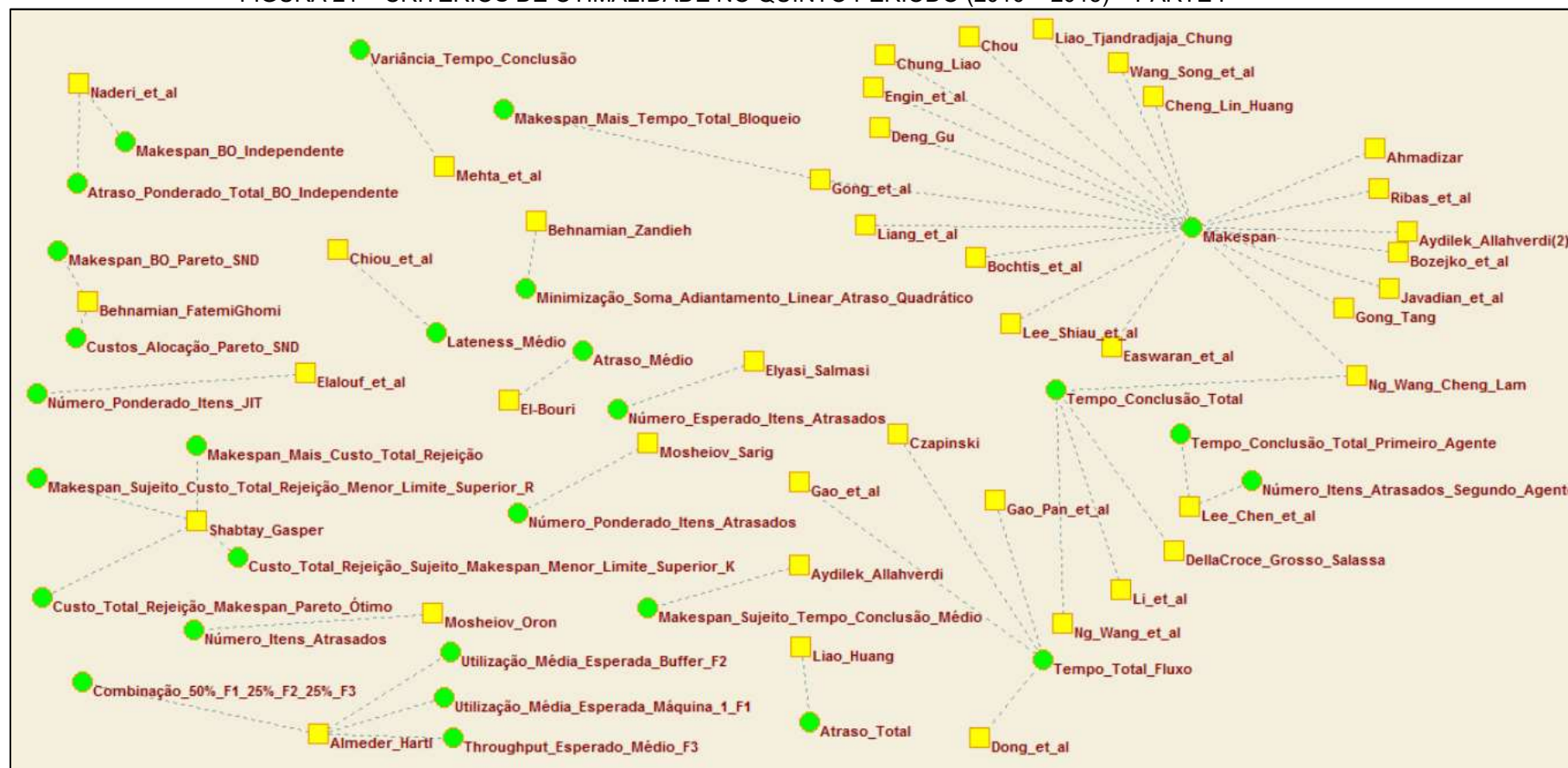
5.7.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Assim como ocorreu na métrica anterior, para que se facilite a visualização e compreensão das redes dessa década, optou-se por dividi-la em duas partes, nos moldes da métrica anterior.

5.7.5.1 Quinto Período – Parte I

Neste excerto do Quinto Período, tem-se grande variedade de objetivos estudados, com critérios inéditos, como o *throughput* e a abordagem de fronteiras de Pareto em modelos multiobjetivos. A Figura 21 retrata os critérios de otimalidade estudados nesse período.

FIGURA 21 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I



FONTE: O Autor (2016).

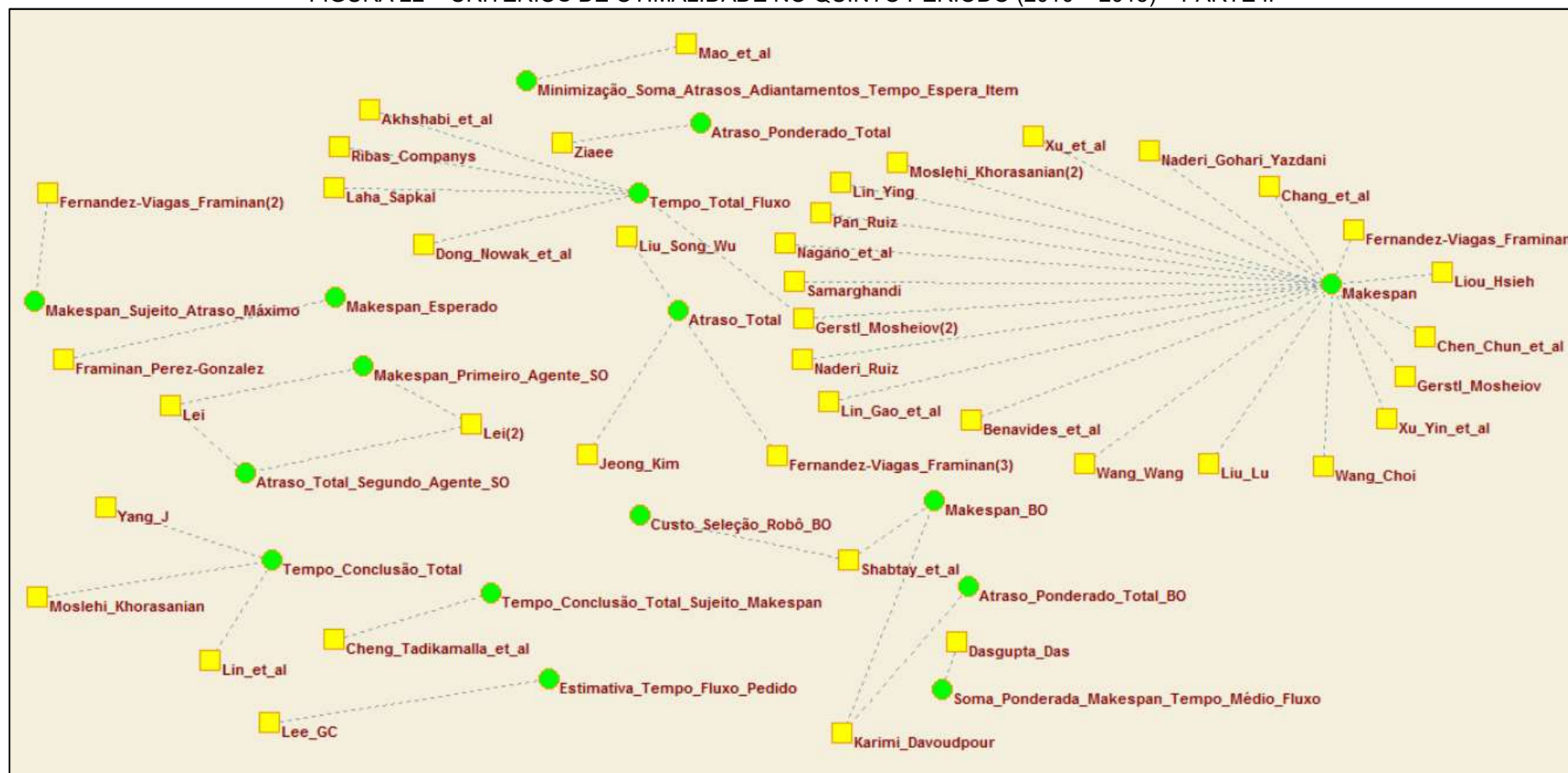
O artigo de Behnamian e Fatemi Ghomi (2011) trata de um modelo multiobjetivo que visa à minimização do *makespan* e dos custos totais de alocação em um *Flow Shop* híbrido. Para resolver esse problema, os autores usam o conceito de soluções não dominadas, ou *Pareto optimal*, isto é, quando nenhuma melhora de um dos critérios ocorre sem que haja prejuízo do outro objetivo.

Outro artigo que se deve citar de maneira particular é aquele de Almeder e Hartl (2013), em que se faz um estudo de uma indústria metalúrgica. Nessa publicação, os autores trabalham com a temática de *buffers* limitados e com modelos estocásticos, em um ambiente flexível multiestágio. Em relação aos objetivos da otimização proposta, tem-se a utilização média esperada do *buffer*, a utilização média esperada da máquina 1, o *throughput* esperado médio e uma combinação dos três critérios, em que se atribui 50% de importância relativa ao primeiro critério e 25% aos outros dois.

5.7.5.2 Quinto Período – Parte II

Nesse período analisado, destaca-se os modelos com objetivos hierárquicos e os modelo que utiliza multi agentes, além da prevalência do *makespan* sobre todos os outros critérios de otimalidade, assim como ocorre em todas décadas avaliadas. A Figura 22 traz os resultados concernentes a esse período.

FIGURA 22 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II



FONTE: O Autor (2016).

Em relação aos modelos hierárquicos, estes são definidos como tipos de problema em que a otimização do segundo critério está condicionada à prévia otimização do outro objetivo. São trabalhos que trataram desse assunto os artigos de Fernandez-Viagas e Framinan (2015), em que a minimização do *makespan* está condicionada à prévia otimização do atraso máximo. E o artigo de Cheng et al. (2014), que a minimização do tempo de conclusão total está sujeita à minimização do *makespan*.

No que tange aos modelos multiagentes, os artigos de Lei (2015) e Lei (2015) tratam dessa questão, que é raramente tratada em modelos de Programação da Produção, especialmente aqueles diversos da Máquina Única. Nesse trabalho, os autores propõem uma otimização simultânea do *makespan*, que é responsabilidade do primeiro agente e do atraso total, de encargo do segundo agente no processo de otimização. Cada agente é responsável por um certo grupo de itens a ser processados e estes afetam um ao outro, com os critérios de otimalidade conflitantes, devido à competição dos agentes por recursos de processamento, o que torna o processo de otimização complexo e o problema com difícil resolução

Em suma, ao se tratar dos critérios de otimalidade, tem-se a indubitável superioridade do *makespan* se comparado aos demais objetivos. Para trabalhos futuros, pontos a ser explorados envolvem modelos multiobjetivos e funções de custo, posto que esta última pode ser melhor mensurada sob a ótica gerencial da produção.

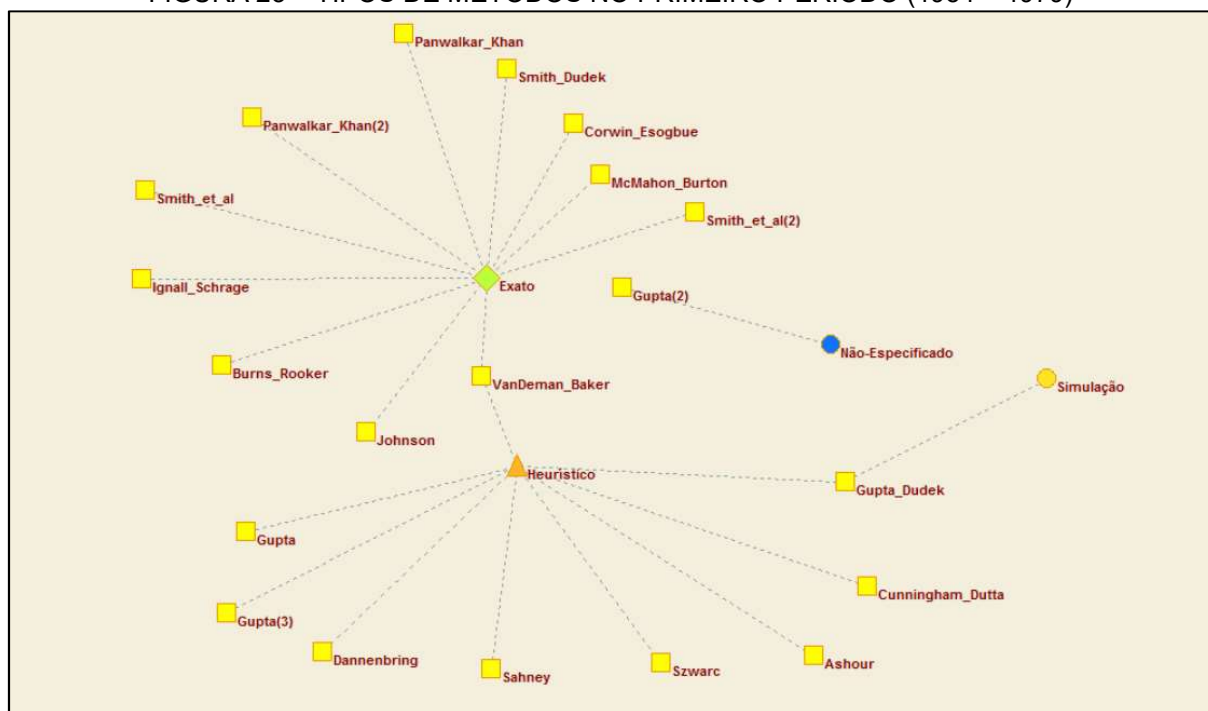
5.8 TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS

Nesta métrica fez-se análises acerca dos tipos de métodos utilizados pelos autores, classificados aqui em sete categorias: exato, representado na rede por um diamante na cor verde primavera; heurístico, representado por um triângulo na cor *Dandelion*; meta-heurístico, simbolizado por uma elipse na cor fúcsia; não-especificado, representado por um círculo na cor azul-marinho; simulação, simbolizado por um círculo na cor dourado; híbrido, representado por um círculo na cor rosa; e *math-heuristic*, simbolizado por um círculo na cor *Cerulean*. Os autores, do mesmo modo que em seções anteriores, são representados por quadrados amarelos e a ligação tipo de método-autor é representada por linhas tracejadas na cor preta.

5.8.1 Primeiro Período (1954 – 1979)

Os métodos resolutivos nesse período resumem-se, majoritariamente, em métodos exatos e heurísticos. A Figura 23 retrata a rede representativa dessa primeira década.

FIGURA 23 – TIPOS DE MÉTODOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

Em relação às publicações que utilizaram métodos exatos, destacam-se os trabalhos de Johnson (1954), que propôs um método dessa natureza para problemas de duas máquinas; Ignall e Schrage (1965), para problemas de duas e três máquinas; e McMahon e Burton, que propôs modificações ao método de Ignall e Schrage e conseguiu resolver problemas de até 45 itens e três máquinas.

Em relação aos autores que propuseram heurísticas na resolução de problemas de *Flow Shop*, há que se destacar o trabalho de Dannenbring (1977), cuja melhor heurística proposta foi o mais robusto método heurístico encontrado na literatura.

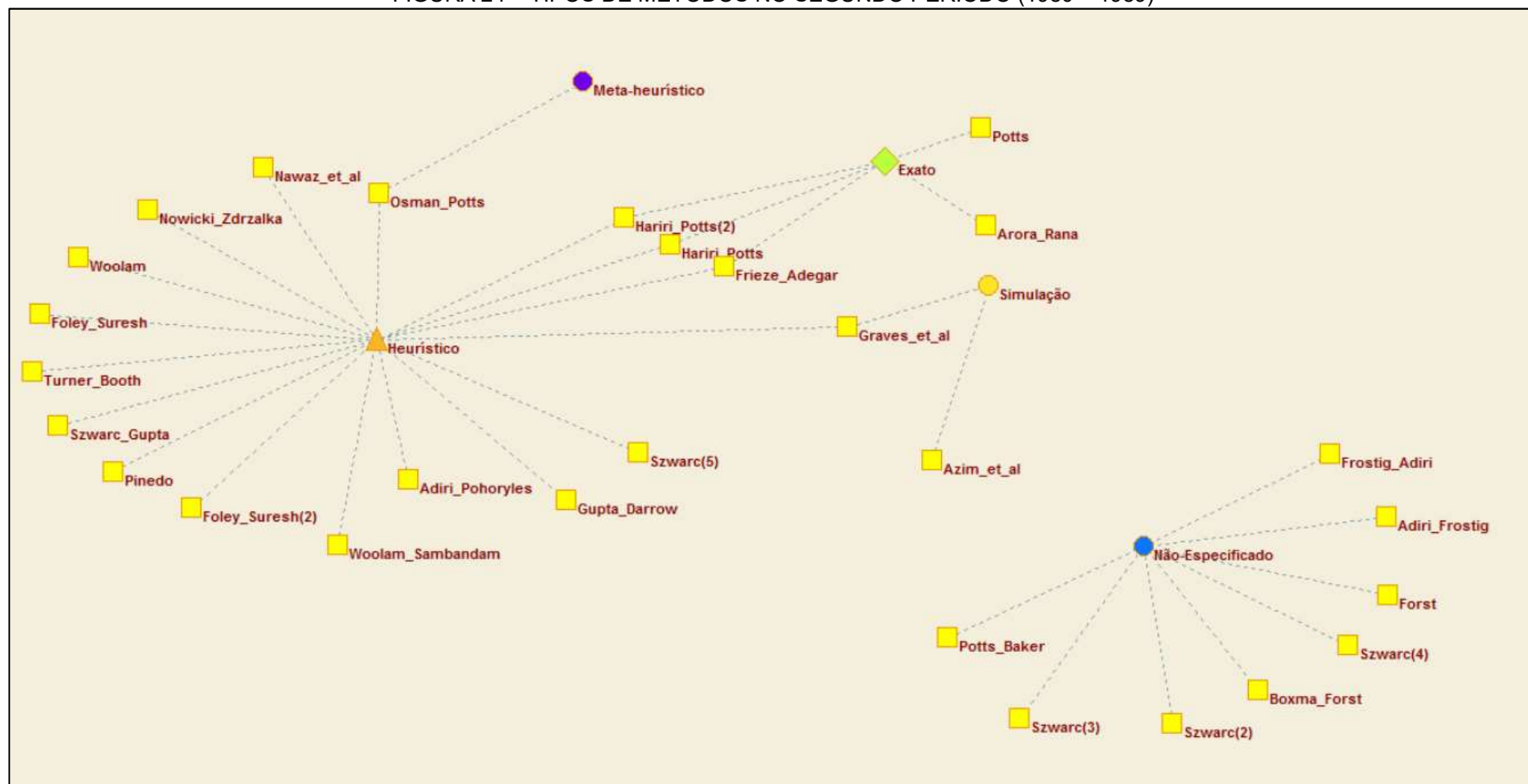
Em relação aos demais métodos, tem-se o trabalho de Gupta e Dudek (1971), que fez uso de uma simulação em que se compara o resultado obtido por diferentes critérios de otimalidade. E há que se ressaltar o trabalho de Gupta (1976), que não

especifica um método resolutivo em seu artigo, mas teoriza acerca de considerações respectivas a modelos de Programação da Produção sem espera.

5.8.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Neste período tem-se uma diminuição considerável de estudos que exclusivamente utilizam metodologias exatas, a predominância de métodos heurísticos e o primeiro trabalho que utiliza meta-heurística dentre os pertencentes ao escopo desta dissertação. A Figura 24 traz a rede que sintetiza o período em relação a essa métrica.

FIGURA 24 – TIPOS DE MÉTODOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989)



FONTE: O Autor (2016).

O trabalho de Osman e Potts (1989) tem a distinção de ser o primeiro a utilizar uma meta-heurística na resolução de problemas de *Flow Shop*. Os autores resolveram problemas de até 20 máquinas e 100 itens, comparando os resultados com as melhores heurísticas do período.

Em relação aos artigos que utilizaram heurísticas, há que se destacar o trabalho de Nawaz, Enscore e Ham (1983), cuja heurística autoral se tornou a mais robusta heurística de Programação da Produção. Esta foi comparada com a heurística de Dannenbring em Turner e Booth (1987) e seus resultados foram melhores tanto em *makespan* obtido quanto em tempo computacional.

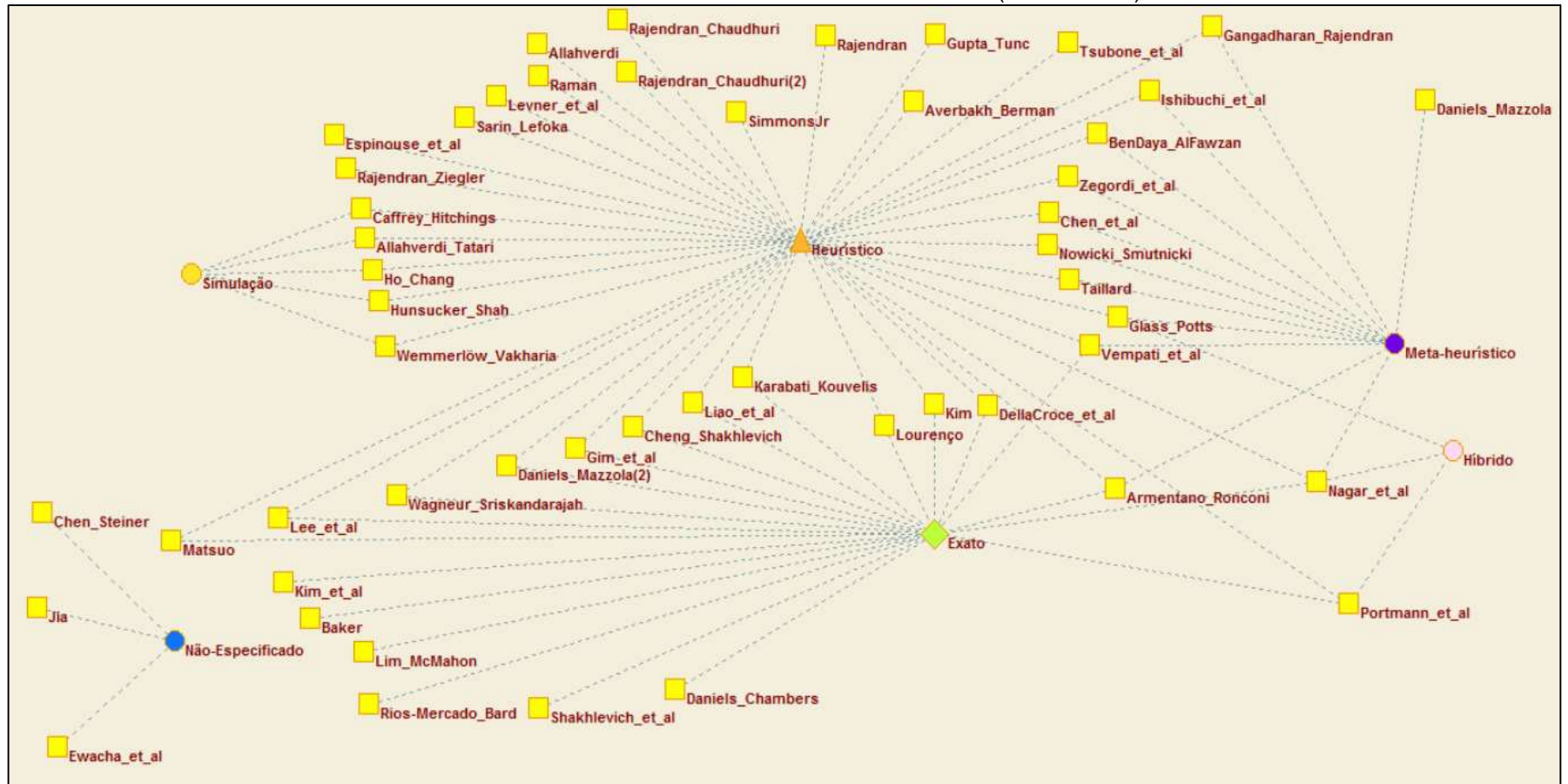
Outros pontos relevantes da década são a baixa quantidade de artigos que se detiveram ao método exato (2 de 28) e a quantidade de publicações que não especificaram um método resolutivo. Em relação ao primeiro, tem-se os artigos de Arora e Rana (1980), que utilizou um método autoral em problemas sem espera e com tempos de processamento semiordenados. E Potts (1980) que propôs uma regra de ramificação adaptativa e a utilizou na resolução de modelos permutacionais.

No que tange ao segundo, há que se destacar o trabalho de Adiri e Frostig (1984) que tratou de modelos estocáticos e permutacionais, com o objetivo de provar que o sequenciamento dos itens em ordem crescente dos tempos de processamento diminui a distribuição de probabilidade do *makespan*.

5.8.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Esse período é marcado pelo aumento do uso de meta-heurísticas, pela primeira hibridação de métodos e pela preocupação constante dos autores em utilizar mais de um tipo de método resolutivo em suas publicações. A Figura 25 traz a rede que resume o período estudado.

FIGURA 25 – TIPOS DE MÉTODOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2016).

No tangente à utilização de hibridações, esta está presente nos trabalhos de Glass e Potts (1996), Nagar et al. (1996) e Portmann et al. (1998). No primeiro, os autores hibridizam uma heurística a uma meta-heurística em problemas de até 10 máquinas e 50 itens. Esse trabalho também merece destaque devido ao uso por parte dos autores de três tipos de métodos, a saber, heurísticos, meta-heurísticos e híbridos.

Em relação aos dois últimos os autores combinam um método exato a uma meta-heurística. Nagar et al. (1996) utiliza essa hibridação em problemas de até 100 itens, visando à minimização do *makespan* e do tempo médio de fluxo, enquanto Portmann et al. (1998) trabalha o mesmo tipo de combinação de métodos em um *Flow Shop* híbrido.

No que diz respeito aos demais pontos desse período, tem-se o considerável uso de heurísticas e a maior frequência de procedimentos meta-heurísticos nos artigos. Em relação ao primeiro, se pode citar o trabalho de Gupta e Tunc (1994), que utilizou esse tipo de método em um *Flow Shop* estocástico, com dois estágios e com tempos de preparação e remoção dos itens separados dos tempos de processamento. Em relação ao último, tem-se como exemplo a publicação de Daniels e Mazzola (1993) que empregou meta-heurística na resolução de um problema de até 10 itens e 5 estações de trabalho, com considerações acerca da flexibilidade de recursos, isto é, o tempo de processamento do item depende da quantidade de recurso alocada àquela operação.

5.8.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Nesse excerto, em razão da quantidade de artigos e tipos de métodos resolutivos empregados, optou-se por fazer uma nova categorização do período, considerando-se nesta a separação por tipo de método, isto é, em cada subseção seguinte far-se-á o registro detido dos tipos de métodos principais do período, a saber, heurísticos e exatos. Haverá também uma rede que mencionará os demais categorias de métodos resolutivos desse estrato temporal. Há que se considerar que em muitos casos os mesmos autores aparecerão em mais de uma rede, posto que há artigos que tratam de mais de um tipo de método.

5.8.4.1 Método exato

Nesse período, muitas publicações se dedicaram ao estudo, ao menos em uma seção de seus trabalhos, aos métodos exatos. Dos 69 artigos que pertencem ao período verificado, 32 utilizaram métodos exatos.

Nesse tocante, convém mencionar alguns trabalhos aqui categorizados. O artigo de Yokoyama (2001) utilizou método exato em modelo de *Flow Shop* híbrido com dados estocásticos e considerações acerca de operações de montagem; Ronconi (2005), utiliza metodologia exata na resolução de um problema de *Flow Shop* com bloqueio, utilizando como validação de seu método a resolução das instâncias de Taillard; Fondrevelle et al. (2008) utilizou procedimento resolutivo exato em modelo permutacional, com janelas de tempo entre cada par de operações consecutivas, visando à minimização da soma ponderada dos tempos de conclusão de cada máquina. O Quadro 2 contém os autores e por extensão, os artigos, que se valeram, exclusiva ou inexclusivamente, desse tipo de método, bem como o número de citações de cada artigo de acordo com a *Web of Science*.

QUADRO 2 – AUTORES QUE USARAM O MÉTODO EXATO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) (CONTINUA)

Autor	Número de citações
Cheng et al. (2000)	5
Della Croce et al. (2000)	17
Moursli; Pochet (2000)	83
Azizoğlu et al. (2001)	35
Néron et al. (2001)	51
Yokoyama (2001)	18
Chung et al. (2002)	38
Della Croce et al. (2002)	36
Sung; Kim (2002)	37
Bulfin; M'Hallah (2003)	25
Hou; Hoogeveen (2003)	16
Oğuz et al. (2003)	51
Daniels et al. (2004)	20
Huq et al. (2004)	12
Ng; Kovalyov (2004)	12
Tseng et al. (2004)	21

QUADRO 2 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO EXATO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009)

Yeung et al. (2004)	38
Błażewicz et al. (2005)	18
Bouquard et al. (2005)	5
Ronconi (2005)	53
Chen (2006)	20
Chung et al. (2006)	32
Eren; Güner (2006)	13
Grabowski; Pempera (2007)	63
Wang; Cheng (2007)	5
Chen; Pan; Lin (2008)	47
Chen; Pan; Wu (2008)	20
Fondrevelle et al. (2008)	6
Yang et al. (2008)	24
Choi; Lee (2009)	14
Choi; Kim (2009)	14
Ronconi; Henriques (2009)	32

FONTE: O Autor (2017).

5.8.4.2 Método heurístico

No que concerne à utilização de heurísticas, 52 dos 69 dos estudos desse período utilizaram heurísticas em algum momento de seus trabalhos. Se pode citar aqui o trabalho de Eren e Güner (2006), que utiliza essa categoria de método na resolução de um problema bicritério, que visa à minimização da soma ponderada do tempo de conclusão total e do atraso total, em um problema em que se pondera a temática do tempo de preparação das estações de trabalho separados tempos de processamento.

Além desse trabalho, há que se destacar o artigo de Bouquard et al. (2005) que trata de um modelo misto de Programação da Produção, em que há itens que devem ser processados de maneira contínua e itens ditos regulares, que não conservam esse caráter de continuidade. O quadro 3 traz um panorama geral acerca dos artigos que utilizaram métodos heurísticos nessa década.

QUADRO 3 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Cheng et al. (2000)	5
Hong; Wang (2000)	14
Koulamas; Kyparisis (2000)	8
Moursli; Pochet (2000)	83
Sidney et al. (2000)	21
Suliman (2000)	34
Allahverdi; Savsar (2001)	8
Azizoğlu et al. (2001)	35
Soewandi; Elmaghraby (2001)	27
Alcaide et al. (2002)	12
Framinan et al. (2002)	59
Sung; Kim (2002)	37
T'kindt et al. (2002)	102
Bulfin; M'Hallah (2003)	25
Oğuz et al. (2003)	51
Rajendran; Ziegler (2003)	35
Saadani et al. (2003)	15
Daniels et al. (2004)	20
Gupta et al. (2004)	5
Ng; Kovalyov (2004)	12
Yeung et al. (2004)	38
Bouquard et al. (2005)	5
Grabowski; Pempera (2005)	97
Kalczynski; Kamburowski (2005)	16
Low (2005)	45
Ravindran et al. (2005)	31
Ronconi (2005)	53
Wang et al. (2005)	15
Averbakh (2006)	10
Chen (2006)	20
Chung et al. (2006)	32
Eren; Güner (2006)	13
Jin et al. (2006)	41
Kalczynski; Kamburowski (2006)	9
Liu et al. (2006)	65

QUADRO 3 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) (CONCLUSÃO)

Jin et al. (2007)	9
Kalczynski; Kamburowski (2007b)	28
Kalczynski; Kamburowski (2007a)	61
Wang; Cheng (2007)	5
Wang; Edwin Cheng (2007)	12
Chen; Pan; Lin (2008)	47
Chen; Pan; Wu (2008)	20
Pan et al. (2008)	41
Paternina-Arboleda et al. (2008)	19
Shiau et al. (2008)	20
Yang et al. (2008)	11
Al-Anzi; Allahverdi (2009)	23
Chandra et al. (2009)	17
Choi; Lee (2009)	14
Choi; Kim (2009)	14
Davoudpour; Ashrafi (2009)	12
Ronconi; Henriques (2009)	32

FONTE: O Autor (2017).

5.8.4.3 Outros métodos

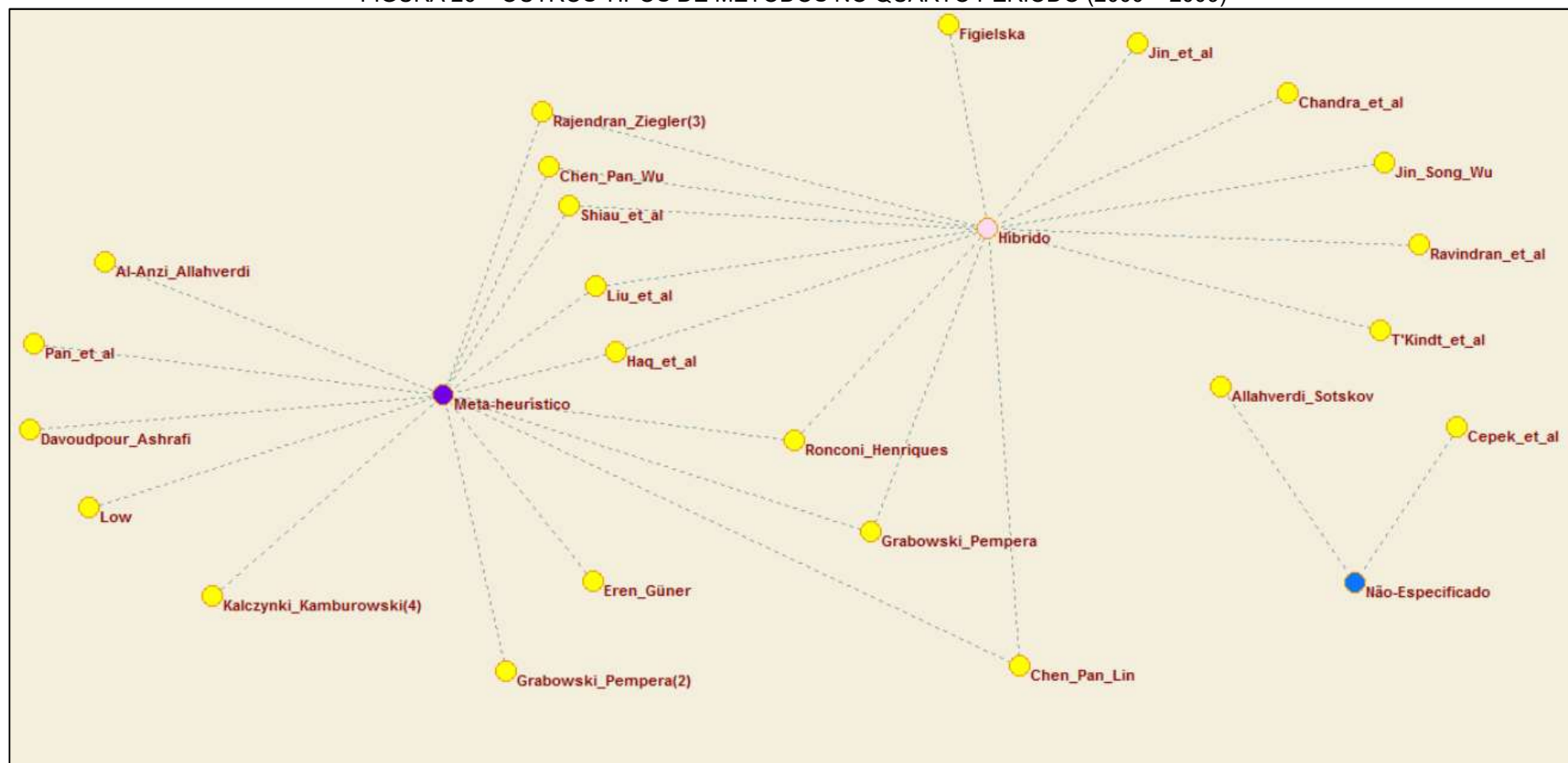
Nesse período além dos métodos supracitados, tem-se em menor quantidade, o uso de meta-heurísticas, métodos híbridos e estudos que não especificaram o método resolutivo utilizado, posto que estão mais detidos à construção de modelos mais gerais e complexos de Programação da Produção.

No que tange às meta-heurísticas, se pode citar o estudo de Davoudpour e Ashrafi, que utiliza, de maneira exclusiva, esse tipo de método na resolução de um problema de *Flow Shop* flexível, com *setup* dependente da sequência e multiobjetivo, caracterizado por um critério não regular, composto pela soma ponderada do adiantamento, atraso, tempo de conclusão e penalidades relacionadas ao descumprimento das datas de entrega, com o intuito de minimizá-lo.

Com respeito a métodos híbridos, destaca-se o artigo de Figielska (2009), que realiza duas hibridações entre heurística e meta-heurística, em um *Flow Shop* híbrido com recursos adicionais, cuja disponibilidade é limitada.

Em referência aos artigos que não especificaram procedimento resolutivo, tem-se o estudo de Allahverdi e Sotskov (2003) que trata dos tempos de processamento aleatórios, em que se conhece apenas os limites superior e inferior destes. A Figura 26 retrata o emprego desses outros tipos de métodos nas publicações correlatas a essa década.

FIGURA 26 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009)



FONTE: O Autor (2016).

5.8.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Nesse estrato temporal, devido ao elevado número de artigos a ser mostrados, a fim de simplificar a visualização das redes, optou-se por dividir a análise desse estrato nos tipos de métodos, dedicando uma rede particular para os que mais frequentemente são estudados, a saber, exatos, heurísticos e híbridos. Construiu-se também outra rede dedicada aos outros métodos.

5.8.5.1 O método exato

No que concerne a esse tipo de método, se pode destacar que vinte e nove das oitenta e duas publicações usaram tal metodologia, ao menos em uma parte de seus estudos. Como exemplo de artigo aqui categorizado, tem-se o trabalho de Easwaran et al. (2010), cujo método autoral é aplicado em um novo modelo de dominância de máquinas proposto pelos autores, em que o somatório dos tempos das máquinas antecessoras à máquina dominante e o somatório dos tempos das máquinas sucessoras à dominante não devem exceder ao menor tempo de processamento registrado na máquina dominante. Nesse trabalho os autores visam à minimização do *makespan* e provam que o valor deste depende tão somente dos tempo de processamento do primeiro e do último itens na sequência.

Apresenta-se os demais casos de artigos que utilizaram esse tipo de método no Quadro 4.

QUADRO 4 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO EXATO NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Easwaran et al. (2010)	5
Gong et al. (2010)	25
Lee et al. (2010)	21
Liao; Huang (2010)	6
Mosheiov; Sarig (2010)	8
Gong; Tang (2011)	11
Ng et al. (2010)	40
Li et al. (2011)	11
Cheng et al. (2012)	2

QUADRO 4 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO EXATO NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONCLUSÃO)

Javadian et al. (2012)	6
Liao et al. (2012)	25
Shabtay; Gasper (2012)	12
Bochtis et al. (2013)	17
Elyasi; Salmasi (2013)	3
Gerstl; Mosheiov (2013)	1
Lin et al. (2013)	0
Lin; Ying (2013)	20
Moslehi; Khorasanian (2013)	8
Wang; Wang (2013)	23
Benavides et al. (2014)	8
Cheng et al. (2014)	7
Della Croce et al. (2014)	2
Gerstl; Mosheiov (2014)	0
Jeong; Kim (2014)	4
Naderi et al. (2014)	5
Shabtay et al. (2014)	7
Xu et al. (2014)	5
Samarghandi (2015)	4
Yang (2015)	2

FONTE: O Autor (2017).

5.8.5.2 Método heurístico

Aplicou-se alguma heurística no todo ou em parte do trabalho em 55 dos 82 artigos a esse período associados. Dentre esses, se pode citar o estudo de Mao et al. (2014) que resolve por meio de uma heurística um problema complexo de *Flow Shop* híbrido com restrições de precedência, sem tempo ocioso, com tempos de transporte não desprezíveis, aplicados a uma indústria siderúrgica.

Outro trabalho a ser destacado nesse período é o de Mosheiov e Sarig (2010), em se empregou método heurístico na solução de um problema em que se faz considerações quanto a existência de máquinas críticas, ou máquinas gargalo. Neste estudo tem-se o objetivo de reduzir o número ponderado de itens atrasados. No Quadro 5, apresenta-se este e os demais artigos correlatos a esse tipo de método.

QUADRO 4 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Gong et al. (2010)	25
Lee et al. (2010)	21
Liang et al. (2010)	16
Mosheiov; Sarig (2010)	8
Naderi et al. (2010)	42
Ng et al. (2010)	40
Gao et al. (2011)	31
Gong; Tang (2011)	11
Lee et al. (2011)	33
Li et al. (2011)	7
Ng et al. (2011)	12
Ribas et al. (2011)	59
Ahmadizar (2012)	19
Aydilek; Allahverdi (2012)	7
Deng; Gu (2012)	24
El-Bouri (2012)	7
Mehta et al. (2012)	0
Mosheiov; Oron (2012)	10
Shabtay; Gasper (2012)	12
Wang et al. (2012)	10
Almeder; Hartl (2013)	12
Aydilek; Allahverdi (2013)	5
Božejko et al. (2013)	16
Chou (2013)	12
Elalouf et al. (2013)	4
Elyasi; Salmasi (2013)	3
Gao et al. (2013)	14
Gerstl; Mosheiov (2013)	1
Chang et al. (2013)	12
Lin et al. (2013)	0
Liu et al. (2013)	8
Moslehi; Khorasanian (2013)	8
Wang; Wang (2013)	23
Ziaee (2013)	2
Cheng et al. (2014)	7
Fernandez-Viagas; Framinan (2014)	18

QUADRO 4 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONCLUSÃO)

Jeong; Kim (2014)	4
Laha; Sapkal (2014)	9
Lee (2014)	0
Liu; Lu (2014)	0
Mao et al. (2014)	24
Moslehi; Khorasanian (2014)	3
Naderi et al. (2014)	5
Naderi; Ruiz (2014)	18
Pan; Ruiz (2014)	13
Xu et al. (2014)	5
Chen et al. (2015)	3
Dasgupta; Das (2015)	7
Fernandez-Viagas; Framinan (2015a)	4
Fernandez-Viagas; Framinan (2015b)	7
Framinan; Perez-Gonzalez (2015)	3
Lin et al. (2015)	7
Ribas; Companys (2015)	4
Samarghandi (2015)	4
Yang (2015)	2

FONTE: O Autor (2017).

5.8.5.3 Híbridizações

Esse período é marcado por uma grande diversidade de artigos em que faz-se algum tipo de combinação entre métodos. Em 42 das 82 publicações restritas a este estrato tem-se alguma hibridização realizada. Nesse tocante, há que se destacar o trabalho de Benavides et al. (2014) que combina duas meta-heurísticas na resolução de um problema em que a força de trabalho é heterogênea, ou seja, o tempo de processamento da tarefa depende do trabalhador que é designado a ela. Outro trabalho a se ressaltar aqui é o de Lin e Ying (2013) que também combina duas meta-heurísticas a fim de minimizar o *makespan* em um problema de *Flow Shop* com bloqueio. Para validar seu modelo, os autores utilizaram as instâncias de Taillard, comparando os seus resultados com demais métodos, híbridos ou não, da literatura. O Quadro 5 retrata esse período em relação a esse tipo de método.

QUADRO 5 – AUTORES QUE UTILIZARAM HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Czapiński (2010)	7
Lee et al. (2010)	21
Liang et al. (2010)	16
Naderi et al. (2010)	42
Behnamian; Fatemi Ghomi (2011)	30
Behnamian; Zandieh (2011)	37
Engin et al. (2011)	41
Lee et al. (2011)	33
Ribas et al. (2011)	59
Aydilek; Allahverdi (2012)	7
Chiou et al. (2012)	4
Deng; Gu (2012)	24
Liao et al. (2012)	25
Wang et al. (2012)	10
Chou (2013)	12
Dong et al. (2013)	16
Gao et al. (2013)	14
Chang et al. (2013)	12
Lin; Ying (2013)	20
Moslehi; Khorasanian (2013)	8
Ziaee (2013)	2
Akhshabi et al. (2014)	7
Benavides et al. (2014)	8
Della Croce et al. (2014)	2
Fernandez-Viagas; Framinan (2014)	18
Karimi; Davoudpour (2014)	2
Moslehi; Khorasanian (2014)	3
Naderi et al. (2014)	5
Naderi; Ruiz (2014)	18
Nagano et al. (2014)	12
Pan; Ruiz (2014)	13
Wang; Choi (2014)	10
Chen et al. (2015)	3
Dasgupta; Das (2015)	7
Fernandez-Viagas; Framinan (2015)	4
Framinan; Perez-Gonzalez (2015)	3

QUADRO 5 – AUTORES QUE UTILIZARAM HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONCLUSÃO)

Lei (2015a)	8
Lei (2015b)	2
Lin et al. (2015)	7
Liou; Hsieh (2015)	3
Ribas; Companys (2015)	4
Samarghandi (2015)	4

FONTE: O Autor (2017).

5.8.5.4 Outros métodos

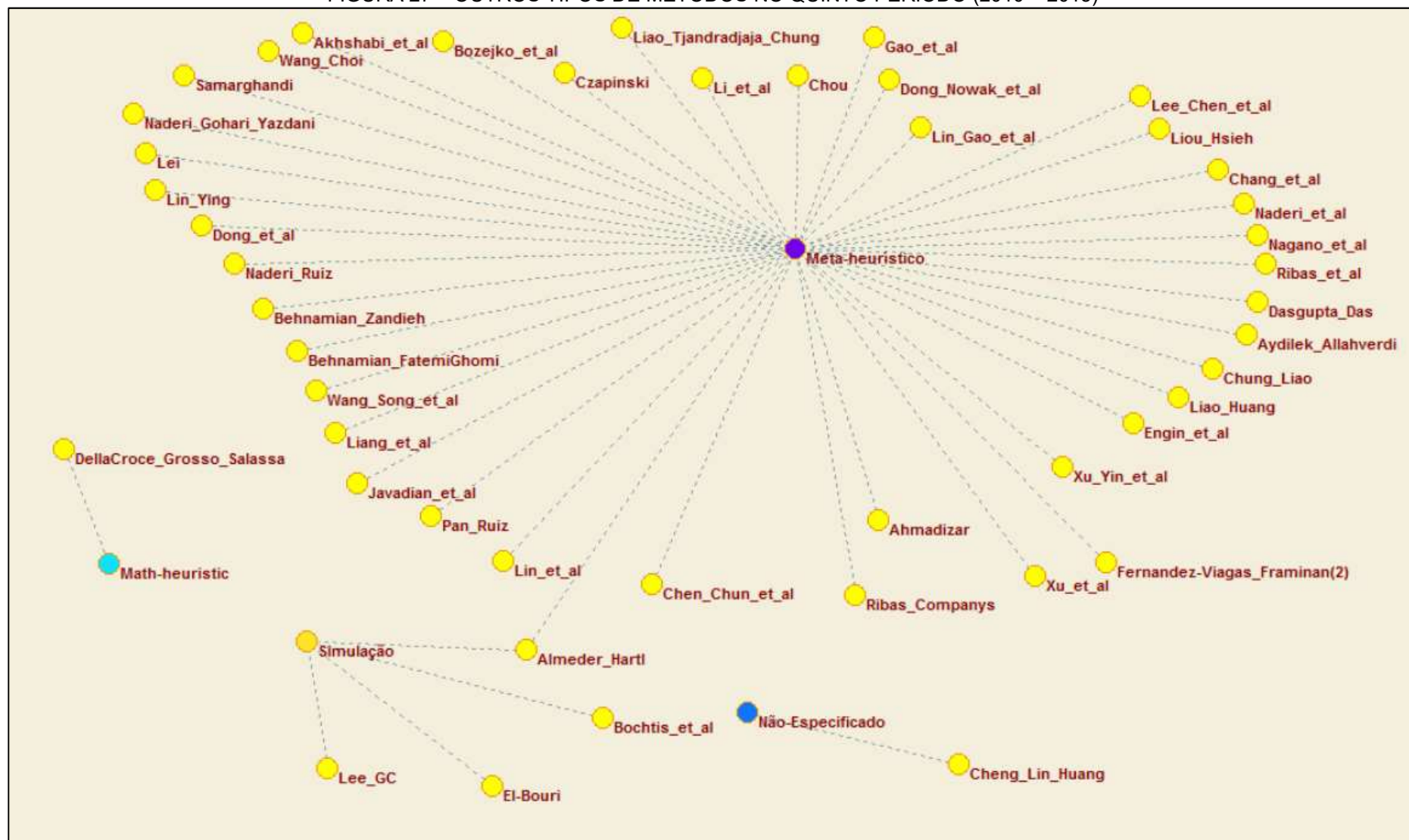
Em relação aos demais tipos de métodos englobados nesse período tem-se uma pronunciada quantidade de métodos meta-heurísticos. Há também como métodos a simulação, a *math-heuristic* e artigos que não especificaram o método.

Em relação aos estudos que utilizaram meta-heurísticas tem-se como exemplo o artigo de Xu et al. (2013), que fez uso desta na resolução de um problema com processamento em paralelo, isto é, alguns itens necessitam ser processados por mais de uma estação de trabalho ao mesmo tempo.

No que tange à simulação, há que se destacar o trabalho de El-Bouri (2012) em que empregou-se esse tipo de método na elaboração de cenários onde variavam-se parâmetros como a rigidez da data de entrega, para que se pudesse comparar o desempenho de diversas heurísticas comuns na literatura com a proposta pelo autor, visando à minimização do atraso médio.

Por fim, por conta do ineditismo no que tange aos artigos arrolados, tem-se o trabalho de Della Croce, Grosso e Salassa (2014) que faz uso de uma *math-heuristic* na solução de um modelo permutacional. A *math-heuristic* repousa na ideia de explorar as forças tanto das meta-heurísticas como dos métodos exatos. Na Figura 27 retrata-se o panorama dos outros métodos no Quinto Período.

FIGURA 27 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015)



FONTE: O Autor (2016).

Em suma, o que se vê ao longo dessas cinco décadas como uma característica presente em todas elas é a grande utilização de heurísticas. Isso se explica a partir da alta complexidade combinatorial que os modelos de Programação da Produção possuem. Assim para resolver problemas maiores, em muitos casos os métodos exatos ficam inviáveis por conta do custo computacional elevado e pelo tempo despendido na otimização desses modelos.

Por outro lado, também é grande a utilização de métodos exatos, apesar da sua diminuição de importância relativa com o passar do tempo. O que se verifica em muitos dos artigos que utilizam métodos exatos é que eles têm um cunho muito mais teórico, dedicados à resolução de problemas de menor porte. No entanto, é também nesses modelos que se testa novas características de itens e, ou critérios de otimalidade, fazendo com que se desenvolva novos conceitos e a modificação de pressupostos preexistentes.

Por fim, há que se destacar o crescimento de meta-heurísticas e de hibridações. Em relação à primeira, seu uso tem tornado possível a resolução de problemas cada vez mais complexos e próximos à realidade encontrada nas empresas. Em relação à última, tem-se optado cada vez mais por hibridações com a finalidade de se potencializar as forças dos métodos que são combinados, em termos de características como convergência, diversificação, entre outros e dirimir as possíveis fraquezas, como alto custo computacional.

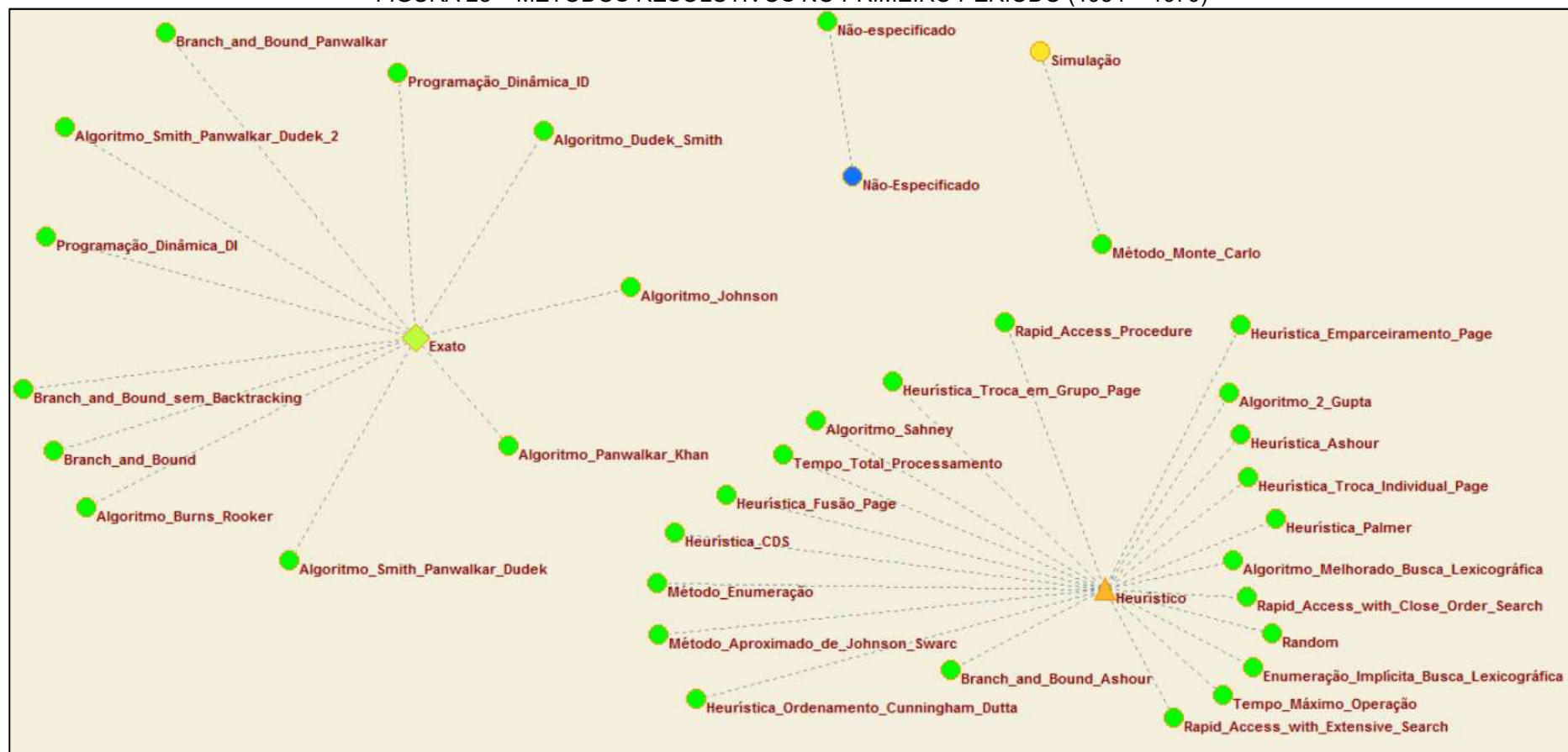
5.9 MÉTODOS RESOLUTIVOS

Em relação a essa métrica, as redes apresentadas não mostrarão os autores dos artigos, mas o tipo de método associado ao método resolutivo propriamente dito. Assim como nas análises anteriores, dividiu-se o estudo em cinco estratos temporais. Contudo, em períodos com grande quantidade de trabalhos, optou-se por dividi-los em relação a cada tipo de método resolutivo. Além disso, há casos em que a quantidade de métodos resolutivos de um mesmo tipo dificulta a visualização nas redes. Nesses casos, fez-se uma nova divisão, estratificando-se o mesmo método em partes ao longo do estrato temporal analisado.

5.9.1 Primeiro Período (1954 – 1979)

Nesse período, tem-se o uso majoritário de heurísticas e métodos exatos. Um ponto a se destacar, posto que esse padrão se repetirá quando da análise de outros períodos, é a quantidade de heurísticas autorais, isto é, não há nos trabalhos um nome específico criado para distinguir o método resolutivo proposto. Além disso, outro ponto a se destacar é a quantidade de métodos que os autores utilizam em um mesmo estudo. Isso se deve ao fato que muitas dessas heurísticas são de simples implementação, o que permite que se teste diversas dessas, a fim de compará-las à luz de um determinado critério. A Figura 28 retrata esse período.

FIGURA 28 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

Em relação aos métodos exatos, há que se destacar o Algoritmo de Johnson, primeiro método a ser estudado quando da resolução de problemas de *Flow Shop*. Quando utilizado para problemas com duas máquinas, apresenta o resultado ótimo, quando da minimização do *makespan*. O método basicamente consiste na análise dos tempos de processamento dos itens nas estações de trabalho. Se o item possui seu menor tempo de processamento na primeira máquina, este deve ser colocado no início da sequência. Caso contrário, deve ser colocado no final da sequência.

Outro método exato que deve ser destacado, por conta da frequência de seu uso é o *Branch and Bound*, cuja variante para Programação da Produção foi proposta inicialmente por Ignall e Schrage (1965). São diversas as variantes encontradas para este método, mas o que normalmente se altera é o cálculo dos *lower bounds*. Ignall e Schrage propuseram seu método para problemas a partir de três máquinas. O método tem início com a escolha de um nó individual (uma tarefa). Calcula-se o tempo total de processamento de cada item ao longo das três estações de trabalho. O nó que tiver o menor tempo de processamento é escolhido como nó inicial. A partir daí combina-se esse nó com os demais nós subsequentes, formando uma sequência com duas tarefas. Avalia-se o menor valor entre a combinação do nó inicial com os nós subsequentes e escolhe-se aquela com menor tempo de processamento. No entanto, se esse valor do limite inferior for superior ao valor de algum dos nós do primeiro nível, deve-se voltar a este nível e iniciar a busca em profundidade por outro nó. O método se encerra quando não há mais nenhum nó a ser avaliado, construindo-se assim a sequência ótima.

Assim, definiu-se que métodos que tivessem alguma variação significativa receberiam o nome do autor, como *Branch and Bound* Panwalkar. Outro método exato que merece destaque é a Programação Dinâmica, utilizada no estudo de Corwin e Esogbue (1971) para problemas em que há tempo de preparação dependente da sequência para uma das máquinas.

Em relação às heurísticas, a figura mostra que usou-se grande quantidade destas. Dentre estas há que se destacar a *Rapid Access with Extensive Search*, proposta por Dannenbring (1977), que foi considerada a melhor heurística para Programação da Produção em sua época. Ela é baseada no conceito de trocas de posição no sequenciamento entre itens adjacentes. Essa troca gera uma nova solução

e a partir desta novas trocas de posições ocorrem até que nenhuma melhora ocorra, que é o critério de parada do método.

Outras heurísticas a ser consideradas importantes para o período são as heurísticas de Palmer e de Campbell, Dudek e Smith (CDS). Na primeira, a idéia que norteia o procedimento é a de que os itens que são colocados nas primeiras posições da sequência devem ter tempos de processamento que tendem a aumentar de máquina a máquina ao longo da sequência tecnológica de produção, enquanto itens dispostos nas posições finais do sequenciamento apresentam necessidades de processamento decrescentes, isto é, os tempos vão diminuindo ao longo da linha.

Em relação à heurística CDS, esta gera um conjunto de $m-1$ subproblemas artificiais de duas máquinas. Cada subproblema é então resolvido utilizando o Algoritmo de Johnson. A sequência do subproblema com menor valor do *makespan* é utilizada para se definir a sequência do problema original.

Conforme anteriormente citado, nota-se a grande quantidade de heurísticas autorais, sendo que muitas delas são tratadas apenas em um artigo específico, não sendo abordadas em outros estudos subsequentes.

5.9.2 Segundo Período (1980 – 1989)

O Segundo Período é marcado como aquele em que se usa uma meta-heurística pela primeira vez nos artigos circunspectos a essa dissertação. Outrossim, este período também apresenta uma grande quantidade de heurísticas utilizadas, bem como de métodos exatos. A Figura 29 traz a rede que simboliza o panorama dessa década em relação aos métodos resolutivos.

FONTE: O Autor (2016).

FONTE: O Autor (2016).

Osman e Potts (1989) utilizaram a meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) como procedimento resolutivo em seu trabalho. Os autores resolveram um modelo permutacional com até 20 máquinas e 100 itens. Nesse trabalho o modo como o SA é usado é definido com base em dois parâmetros: a vizinhança (*neighbourhood*) e o modo como a busca (*search*) é conduzida nessa vizinhança. Após uma série de testes, identificou-se que a combinação de parâmetros que traz os melhores resultados para o problema analisado é aquela em que a vizinhança é do tipo mudança (*shift*). Nesse tipo de vizinhança duas posições no sequenciamento, A e B, são escolhidas. A partir disso, remove-se A de sua posição original e reinsere-se esta na posição B, deslocando as demais posições em uma posição, para frente ou para trás, na sequência. A maneira escolhida para se conduzir a busca na vizinhança foi a busca aleatória (*random search*). Os autores escolheram o SA porque na visão destes é uma meta-heurística muito simples de ser implementada.

Em relação às heurísticas do período deve-se ressaltar aquela que durante muito tempo foi considerada a melhor e que em muitas meta-heurísticas ou hibridações nas décadas seguintes é utilizada como método de solução inicial. Esta heurística é a NEH, proposta por Nawaz, Ensore e Ham (1983). Esse método se inicia pelo arranjo dos itens no sequenciamento de acordo com a ordem decrescente dos tempos totais de processamento, isto é, quanto tempo leva o item para ser completamente concluído na linha de produção. Depois, escolhe-se os dois itens que tem o maior tempo total, como por exemplo, A e C e faz-se a combinação entre as sequencias (A-C ou C-A), escolhendo-se aquela com menor *makespan*. Escolhida essa sequencia, insere-se a terceira tarefa com maior tempo total, como, por exemplo, E. Faz-se a combinação de E em todas as posições possíveis da sequência parcial ótima escolhida anteriormente, como, por exemplo, A-C, formando E-A-C ou A-E-C ou ainda A-C-E. Escolhe-se a sequência formada com menor *makespan*. O processo continua até que todos os itens sejam sequenciados.

Em relação aos métodos exatos, Hariri e Potts (1984) criaram diversas variações de *Branch and Bound* (B&B), a partir de diferentes regras de ramificação (*branching*), propostas por eles ou preexistentes na literatura. O modelo usado pelos autores é um *Flow Shop* com duas máquinas em que restrições de precedência são especificadas. Os autores comparam os resultados em relação ao tempo de resolução que cada regra de ramificação exige e o número de problemas resolvidos e a

quantidade de nós criados necessárias para a resolução do problema. A estratégia de ramificação proposta se dá do seguinte modo: em cada nó, um conjunto de itens apropriado é encontrado e formam-se ramos em que um item desse conjunto é sequenciado antes de todos os itens nesse conjunto ou depois de todos os itens desse conjunto. Nos testes realizados pelos autores essa estratégia de ramificação foi aquela que trouxe os melhores resultados. Esses testes consistiam em instâncias de até 80 tarefas. Dos 480 problemas criados, com dados aleatórios, em 477 deles a estratégia proposta resolve o problema com uma árvore com 500 ou menos nós, enquanto nas outras estratégias de ramificação, a saber, *forward branching* e regra de Kurisu, houve 8 casos que exigiram mais de 500 nós no processo resolutivo.

5.9.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Nesse período, a diversidade de métodos resolutivos aumenta consideravelmente, posto que o número de artigos também cresce, conforme citado em seções anteriores. Em virtude disso, faz-se a estratificação deste à luz dos métodos resolutivos, criando-se redes específicas para cada tipo. No caso das heurísticas, criou-se duas redes auxiliares, para aperfeiçoar a visualização da rede construída.

5.9.3.1 Métodos exatos no Terceiro Período

Em relação a esses métodos, tem-se uma grande quantidade de variações do B&B. Ademais, tem-se que alguns estudos que utilizam as formulações de programação inteira e as aplicam em um *solver* como o CPLEX para obter os resultados. Há também a utilização de Programação Dinâmica, usada em Lourenço (1996).

Em relação às formulações de programação inteira, o artigo de Liao et al. (1995) apresenta dois modelos para *Flow Shop* permutacional flexível. No primeiro modelo, a sequência dos itens é dada e agrega-se ao modelo proposto pelos autores as restrições do modelo de Wagner (1959). No segundo modelo, a sequência dos itens não é dada e, por isso, deve ser determinada. Assim como no primeiro caso, os

autores agregam as restrições de Wagner ao modelo proposto. Em ambas as modelagens, os autores visam à minimização do *makespan*.

Em relação aos modelos exatos destaca-se o Algoritmo 1 de Cheng e Shakhlevich (1999), que trabalha com modelo proporcional. Nesse tipo de problema, cada item tem os mesmos tempos de processamento em todas as máquinas. Nesse estudo, os tempos de processamento são controláveis e comprimíveis a partir de uma função de linear de custo dessa compressão. Esse algoritmo é utilizado em um problema multicritério, que visa à minimização do *makespan* e da função custo de compressão. Portanto, o algoritmo calcula e define a fronteira de Pareto para o problema em questão

No Quadro 6 faz-se o retrato desse estrato temporal, mostrando os autores desse período e os métodos exatos por eles utilizados.

QUADRO 6 – MÉTODOS EXATOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) (CONTINUA)

Autor	Método
Daniels; Chambers (1990)	Algoritmo de Johnson
Matsuo (1990)	Algoritmo de Gilmore e Gomory
Karabati; Kouvelis (1993)	Branch-and-bound Karabati-Kouvelis; Branch-and-bound Bansal
Lee et al. (1993)	Algoritmo de Johnson; Branch-and-bound
Vempati et al. (1993)	Formulação de Programação Inteira de Vempati et al.
Wagneur; Sriskandarajah (1993)	Branch-and-bound de Wagneur- Sriskandarajah
Daniels; Mazzola (1994)	Branch-and-bound
Gim et al. (1994)	Branch-and-bound; Branch-and-bound- Hariri-Potts
Lim; McMahon (1994)	Branch-and-bound
Baker (1995)	Algoritmo de Johnson Adaptado
Ching-Jong Liao et al. (1995)	Formulação de Programação Inteira 1 de Liao et al.; Formulação de Programação Inteira 2 de Liao et al.
Kim (1995)	Branch-and-bound

QUADRO 6 – MÉTODOS EXATOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) (CONCLUSÃO

Della Croce et al. (1996)	Branch-and-bound com Lower Bound de Ignall e Schrage; Branch-and-bound com Lower Bound de Ahmad e Bagchi; Branch-and-bound com Lower Bound de Van de Velde; Branch-and-bound com Lower Bound de Hoogeveen e Van de Velde; Branch-and-bound com Lower Bound de Della Croce et al. Alfa; Branch-and-bound com Lower Bound de Della Croce et al. Beta; Algoritmo de Johnson
Nagar et al. (1996)	Branch-and-bound
Ramalhinho Lourenço (1996)	Programação Dinâmica
Kim et al. (1997)	Algoritmo 1 de Kim et al.; Algoritmo 2 de Kim et al.
Portmann et al. (1998)	Branch-and-bound de Portmann et al.
Shakhlevich et al. (1998)	Algoritmo Menor Tempo Ponderado de Processamento – Custo da Inserção Mínima (WSPT-MCI)
Armentano; Ronconi (1999)	Branch-and-bound
Cheng; Shakhlevich (1999)	Algoritmo 3.1 de Cheng-Shakhlevich; Algoritmo 1 de Cheng-Shakhlevich
Rios-Mercado; Bard (1999)	Branch-and-bound para Programação (BABAS)

FONTE: O Autor (2017).

5.9.3.2 Heurísticas – Parte I

Por conta do grande número de heurísticas utilizadas nesse período, decidiu-se dividir a análise em duas partes: a essa subseção estão relacionados, em ordem cronológica, os vinte e cinco primeiros artigos da década, enquanto na subseção subsequente, versou-se acerca das heurísticas utilizadas nos vinte e seis artigos restantes.

Em relação a essa primeira parte, foram utilizadas diversas heurísticas. Dentre estas, há que se destacar o uso de heurísticas clássicas de sequenciamento. No artigo de Hunsucker e Shah (1992), faz-se uma análise de cenários para um problema de *Flow Shop* dinâmico, com objetivo de minimizar dois critérios de maneira separada,

isto é, não está se estudando uma abordagem multicritério, que são o atraso médio e o número de itens atrasados. Para isso, eles usam heurísticas clássicas, tais como: Primeiro que Entra, Primeiro que Sai (FIFO – *First In First Out*); Último que Entra, Primeiro que Sai (LIFO – *Last In First Out*); Menor Tempo de Processamento (SPT – *Shortest Processing Time*); Maior Tempo de Processamento (LPT – *Longest Processing Time*); Maior Quantidade de Trabalho Restante (MWR – *Most Work Remaining*); Menor Quantidade de Trabalho Restante (LWR – *Least Work Remaining*).

Outra característica marcante do período é a prevalência de heurísticas autorais, que na maioria das vezes não são utilizadas em trabalhos futuros. Além disso há artigos, como o artigo de Wemmerlöv e Vakharia (1991) que utilizam 15 métodos resolutivos em seu estudo. A maioria desses métodos está restrita a heurísticas clássicas de sequenciamento, mas há também considerações a heurísticas como a NEH e a CDS. O Quadro 7 traz um panorama dessa primeira parte.

QUADRO 7 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – PARTE I
(CONTINUA)

Autor	Método
Daniels; Chambers (1990)	EDD; NEH; Heurística de Daniels-Chambers
Matsuo (1990)	FIFO; Algoritmo Aproximado de Matsuo
Rajendran; Chaudhuri (1990)	Algoritmo 1 de Rajendran-Chaudhuri; Algoritmo 2 de Rajendran-Chaudhuri; Algoritmo de Booney-Gundry; Heurística de King-Spachis; Random
Taillard (1990)	Heurística de Gupta; Algoritmo de Johnson generalizado; Heurística de Rajendran; Heurística de Palmer; Heurística CDS; NEH; Algoritmo de Taillard
Ho; Chang (1991)	Heurística de Palmer; Heurística CDS; Heurística de Gupta; Heurística de Dannenbring; Heurística de Hundal-Rajgopal; Heurística de Ho-Chang

QUADRO 7 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – PARTE I
(CONTINUAÇÃO)

Wemmerlöv; Vakharia (1991)	TWK; FCFS; SLACK; Heurística CDS; NEH; FCFS-F Dinâmica; SLACK/PT-F Dinâmica; Heurística CDS-F Dinâmica; NEH-F Dinâmica; Heurística CDS-F Estática; NEH-F Estática; Heurística CDS Estática; NEH Estática; SLACK-Due_Date_Setting (DDS); SLACK/PT-F DDS
Hunsucker; Shah (1992)	FIFO; LIFO; SPT; LPT; MWR; LWR
Rajendran; Chaudhuri (1992)	Heurística 1 de Rajendran-Chaudhuri; Heurística 2 de Rajendran-Chaudhuri; Heurística 3 de Rajendran-Chaudhuri; Heurística MINIT; Algoritmo de Miyazaki; Algoritmo de Ho-Chang
Simons (1992)	Heurística MINIT; Heurística MICOT; Heurística TOTAL; Heurística SETUP; Random; Heurística MINIT-Non-SDST; Heurística MICOT-Non-SDST
Karabati; Kouvelis (1993)	Relaxação Lagrangiana
Lee et al. (1993)	Algoritmo A de Lee et al.; Heurística H1 de Lee et al.; Heurística H2 de Lee et al.; Heurística H3 de Lee et al.
Rajendran (1993)	Heurística 1 de Rajendran-Chaudhuri; Heurística MINIT; Algoritmo de Miyazaki; Algoritmo de Ho-Chang
Sarin; Lefoka (1993)	Heurística SL de Sarin-Lefoka; NEH
Tsubone et al. (1993)	Heurística 1 de Tsubone et al.; Heurística 2 de Tsubone et al.; Regra 1 de Tsubone et al.; Regra 2 de Tsubone et al.; Regra 3 de Tsubone et al.; FCFS
Vempati et al. (1993)	Heurística de Ho_Chang; Random; Heurística CDS; Heurística de Dannenbring
Wagneur; Sriskandarajah (1993)	Algoritmo de Gilmore e Gomory
Daniels; Mazzola (1994)	Heurística FRS
Gangadharan; Rajendran (1994)	Heurística de Ho-Chang; Heurística de Ogbu-Smith
Gim et al. (1994)	Regra de Johnson Adaptada; Procedimento de Dharan-Morton

QUADRO 7 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – PARTE I
(CONCLUSÃO)

Gupta; Tunc (1994)	Heurística H1 de Gupta-Tunc; Heurística H2 de Gupta-Tunc; Heurística H3 de Gupta-Tunc; Heurística H4 de Gupta-Tunc
Caffrey; Hitchings (1995)	Heurística GTPT (Maior Tempo Total de Processamento); Heurística Menor Tempo Total de Processamento (LTPT)

FONTE: O Autor (2017).

5.9.3.3 Heurísticas – Parte II

Dentre as ocorrências desse período há que se destacar o uso da heurística NEH em vários trabalhos aqui categorizados. Dos vinte e seis trabalhos desse estrato, sete deles utilizaram em algum momento este método, o que mostra o quão relevante é o método, pois é, indubitavelmente, um dos poucos que foram utilizados em outros trabalhos além daquele que o originou.

As heurísticas clássicas também aparecem nesse período. No entanto, tem-se aqui heurísticas mais completas e com resultados melhores, como Data de Entrega Modificada (MDD – *Modified Due Date*), que se distingue da EDD, porque a primeira considera o sequenciamento parcial construído, enquanto a última considera apenas as datas de entrega dos itens.

No Quadro 8, tem-se o panorama no que concerne às heurísticas utilizadas nesse período, em que se verifica também a quantidade de algoritmos autorais.

QUADRO 8 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – PARTE II
(CONTINUA)

Autor	Método
Ching-Jong Liao et al. (1995)	Heurística de Liao et al.; NEH
Ishibuchi et al. (1995)	NEH
Kim (1995)	Algoritmo de Sen et al.
Raman (1995)	MOD; Heurística MFS; Heurística Botflow 3; Heurística de Rachamadugu-Morton 1; Heurística de Rachamadugu-Morton Iter; Heurística FSD; Heurística SB-1; Heurística SB-2

QUADRO 8 – HEURÍSTICAS DO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – PARTE II
(CONCLUSÃO)

Zegordi et al. (1995)	Heurística CDS; NEH
Allahverdi; Tatari (1996)	Regra de Eliminação de Allahverdi-Mittenhal; Regra de Talwar; Regra de Johnson; Regra Diagonal; SPT; LPT
Chen et al. (1996)	Random; Heurística CDS; Heurística de Dannenbring; Heurística de Rajendran-Chaudhuri Baseada na Inserção de Itens (JIB)
Della Croce et al. (1996)	SPT1; SPT2; SRPT
Glass; Potts (1996)	Threshold Accepting; Algoritmo de Descida Multi Início
Nagar et al. (1996)	SPT
Nowicki; Smutnicki (1996)	NEH; Algoritmo de Werner; Algoritmo de Taillard
Ramalhinho Lourenço (1996)	Algoritmo ABZ; NEH; Algoritmo de Sevast'yanov
Levner et al. (1997)	Algoritmo de Levner et al.
Rajendran; Ziegler (1997)	Heurística de Rajendran-Ziegler; Heurística de Rajendran-Ziegler com Procedimento de Melhoria (IS); Heurística de Gelders-Sambandam; Heurística de Gelders-Sambandam com IS
Ben-Daya; Al-Fawzan (1998)	NEH
Portmann et al. (1998)	SPT; LPT; Random
Allahverdi (1999)	SPT; SPT1; SPT2
Armentano; Ronconi (1999)	NEH; MDD; Heurística de Inserção
Averbakh; Berman (1999)	SYMM de Averbakh-Berman; SYMM-2 de Averbakh-Berman
Cheng; Shakhlevich (1999)	Algoritmo 3.2 de Cheng-Shakhlevich
Espinouse et al. (1999)	Algoritmo 1 de Espinouse et al.; Algoritmo de Gilmore e Gomory

FONTE: O Autor (2017).

5.9.3.4 Outros métodos

Em relação aos demais métodos, tem-se uma grande utilização de meta-heurísticas nessa década. Destaque nesse tocante se refere ao emprego da Busca

Tabu e suas variações, responsáveis por 12 dos 38 métodos resolutivos aqui categorizados. Há que se ressaltar o trabalho de Nowicki e Smutnicki (1996) cuja meta-heurística, intitulada pelos autores como TSAB (*Tabu Search with Back Jump Tracking*) foi considerada durante muito tempo o estado da arte em métodos resolutivos, melhorando todos os resultados das instâncias mais complexas de Taillard, que contém 500 itens e 20 máquinas.

Outras meta-heurísticas a se destacar nesse período são o SA, presente no trabalho de Gangadharan e Rajendran (1994) e Algoritmos Genéticos (AG), presentes no estudo de Chen et al. (1996).

Esse período é marcado também pelo início da utilização de hibridações, dentre as quais destaca-se aquela realizada no artigo de Portmann et al. (1998) em que se hibridizou o B&B com AG. A Figura 30 traz a rede que retrata esse período, no que diz respeito aos outros métodos resolutivos.

FIGURA 30 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA III



FONTE: O Autor (2016).

5.9.4 Quarto Período (2000 – 2010)

Por conta do elevado número de métodos resolutivos nesse período empregados, optou-se por estratificá-lo nos moldes anteriores. No entanto, pelo considerável número de heurísticas utilizadas, fez-se a estratificação desse método em três partes.

5.9.4.1 Métodos exatos

Em relação aos métodos exatos tem-se novamente uma grande utilização do B&B e variações. Destas, destaca-se o trabalho de Néron et al. (2001) que utilizou a metodologia para resolver problemas de *Flow Shop* híbrido, com até 15 itens e 5 estágios.

Outro método a se destacar é aquele proposto por Wang e Cheng (2007), em que se resolve um problema com tempos de *setup* antecipatórios, isto é, quando há tempo ocioso na máquina 2, esta pode ser preparada para receber um item que está sendo processado na máquina 1, mesmo antes do término do processamento deste e restrições de disponibilidade de itens, com a finalidade de minimizar o *makespan*. O Quadro 9 traz o panorama dos métodos exatos do Quarto Período, que assim como os demais períodos é permeado por metodologias autorais, cuja continuidade em trabalhos que não os seus próprios é pouco verificada.

QUADRO 9 – MÉTODOS EXATOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) (CONTINUA)

Autor	Método
Cheng et al. (2000)	Algoritmo de Cheng et al.
Della Croce et al. (2000)	Branch-and-bound DGT
Moursli; Pochet (2000)	Branch-and-bound
Azizoğlu et al. (2001)	Branch-and-bound
Néron et al. (2001)	Branch-and-bound de Néron et al.; Algoritmo 1 de Néron et al.; Branch-and-bound
Yokoyama (2001)	Branch-and-bound
Chung et al. (2002)	Branch-and-bound; Branch-and-bound de Ahmad-Bagchi
Della Croce et al. (2002)	Branch-and-bound DCGT

QUADRO 9 – MÉTODOS EXATOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) (CONCLUSÃO)

Sung; Kim (2002)	Formulação de Programação Inteira de Sung-Kim
Bulfin; M'Hallah (2003)	Branch-and-bound
Hou; Hoogeveen (2003)	Programação Dinâmica
Oğuz et al. (2003)	Branch-and-bound
Daniels et al. (2004)	Branch-and-bound
Huq et al. (2004)	Programação Linear Inteira Mista de Huq et al.
Ng; Kovalyov (2004)	Programação Dinâmica
Tseng et al. (2004)	Modelo de Wagner; Modelo de Wilson; Modelo de Manne; Modelo de Liao-You
Yeung et al. (2004)	Branch-and-bound
Błażewicz et al. (2005)	Programação Dinâmica
Bouquard et al. (2005)	Programação Dinâmica
Ronconi (2005)	Branch-and-bound; Branch-and-bound de Ronconi-Armentano
Chen (2006)	Branch-and-bound; Formulação Inteira Binária de Chen
Chung et al. (2006)	Branch-and-bound CFK; Branch-and-bound de Kim
Eren; Güner (2006)	Formulação de Programação Inteira de Eren-Güner
Grabowski; Pempera (2007)	Algoritmo RON de Ronconi
Wang; Cheng (2007)	Algoritmo H0 de Wang-Cheng
Chen; Pan; Lin (2008)	Formulação de Programação Inteira de Chen-Pan-Lin
Chen; Pan; Wu (2008)	Formulação de Programação Inteira de Chen-Pan-Wu
Fondrevelle et al. (2008)	Branch-and-bound
Yang et al. (2008)	Branch-and-bound
Choi; Lee (2009)	Branch-and-bound
Choi; Kim (2009)	Branch-and-bound
Ronconi; Henriques (2009)	Branch-and-bound

FONTE: O Autor (2017).

5.9.4.2 Heurísticas – Parte I

Ao todo, pertencem a esse período 69 artigos. Como existe um grande número de heurísticas presentes nesses artigos, optou-se por dividir o período em três partes. Nessa primeira parte, o Quadro 10 traz as heurísticas nos primeiros vinte e três artigos do período, em ordem cronológica.

Em relação a esse período, há que se destacar o trabalho de Oguz et al. (2003), em que usou-se 33 heurísticas. Destas, 9 foram propostas pelo autor. As 24 restantes provieram da literatura e são constituídas por heurísticas de sequenciamento clássicas, também chamadas de regras de prioridade (*dispatching rules*). O problema resolvido foi de um *Flow Shop* híbrido com dois estágios, visando à minimização do *makespan*. Os procedimentos resolutivos criados utilizam as heurísticas preexistentes para construir a sequência inicial a ser utilizada por cada uma das nove heurísticas propostas. A partir desse momento, o passo seguinte de cada método é a determinação de como se dará a programação dos itens, que pode ser de dois tipos: para frente (*forward scheduling*) ou para trás (*backward scheduling*). Na primeira, dada uma sequência S , constrói-se a programação no estágio 1 a partir da designação do primeiro item não alocado de S ao menor instante de início possível, isto é, quando há uma máquina disponível para o processamento. Depois de todas as tarefas passarem pelo estágio 1, constrói-se a programação do estágio 2. Na segunda, a programação começa pelo estágio 2 e o estágio 1 é programado depois, a partir da última tarefa sequenciada no estágio 2.

QUADRO 10 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) – PARTE I
(CONTINUA)

Autor	Método
Cheng et al. (2000)	Algoritmo de Gilmore e Gomory
Hong; Wang (2000)	Triangular Fuzzy LPT; Triangular Fuzzy Johnson
Koulamas; Kyparisis (2000)	Heurística H0 de Koulamas-Kyparisis; HL de Koulamas-Kyparisis; HS de Koulamas-Kyparisis
Moursli; Pochet (2000)	Heurística SF; Heurística SFC; Heurística SBC; Heurística SB; Heurística CDS; Heurística Primal-Dual de Moursli-Pochet

QUADRO 10 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) – PARTE I
(CONCLUSÃO)

Sidney et al. (2000)	Algoritmo A de Sydney et al.; Algoritmo H1 de Sydney et al.; Algoritmo H2 de Sydney et al.; Algoritmo H de Sydney et al.
Suliman (2000)	Heurística de 2 Fases de Suliman; Heurística CDS; Heurística de Palmer; Heurística de Dannenbring; NEH
Allahverdi; Savsar (2001)	LPT; SPT
Azizoğlu et al. (2001)	SRPT; SPT; Heurística H1 de Azizoglu et al.; Heurística H2 de Azizoglu et al.; Heurística H3 de Azizoglu et al.
Soewandi; Elmaghraby (2001)	Heurística SP1-H1 de Soewandi-El Maghraby; Heurística SP2-H2 de Soewandi-El Maghraby; Heurística TS-CJ
Alcaide et al. (2002)	Algoritmo 1 de Alcaide et al.; Algoritmo 2 de Alcaide et al.
Framinan et al. (2002)	NEH; Heurística À Priori de Framinan et al.; Heurística Á Posteriori de Framinan et al.; Heurística de Woo-Yin; Heurística de Ho; Heurística de Sridhar-Rajendran
Sung; Kim (2002)	Heurística PDSPT; Heurística DSPT-FOE
T'kindt et al. (2002)	Heurística de Inserção; Heurística TGB; Heurística de Busca Local
Bulfin; M'Hallah (2003)	Heurística de Bulfin-M'Hallah
Oğuz et al. (2003)	Random; SPT1; SPT2; LPT1; LPT2; SPR1; SPR2; LPR1; LPR2; S-PTPR1; S-PTPR2; L-PTPR1; L-PTPR2; S-PT/PR-1; S-PT/PR-2; L-PT/PR-1; L-PT/PR-2; S-PTPR-12; L-PTPR-12; Heurística de Johnson-p; Heurística de Johnson-p/size; Heurística de Johnson-size; Heurística H1 de Oguz et al.; Heurística H2 de Oguz et al.; Heurística H3 de Oguz et al.; Heurística H4 de Oguz et al.; Heurística H5 de Oguz et al.; Heurística H6 de Oguz et al.; Heurística H7 de Oguz et al.; Heurística H8 de Oguz et al.; Heurística H9 de Oguz et al.

FONTE: O Autor (2017).

5.9.4.3 Heurísticas – Parte II

Nesse período persiste a maior frequência de heurísticas autorais. Outro ponto é que se verifica uma menor quantidade de heurísticas nesse parte se comparado com o estrato anterior. Há que se destacar aqui o artigo de Saadani et al. (2003), que empregou duas heurísticas na resolução de problemas de *Flow Shop* permutacional sem tempo ocioso, com três máquinas, visando à minimização do *makespan*. A primeira heurística, apresentada na rede como Heurística_Saadani_et_al consiste, primeiramente em considerar apenas os tempos de processamento dos itens na segunda e terceira máquinas, criando uma espécie de problema de duas máquinas artificial. Depois, utiliza-se a regra de Johnson para determinar a sequência associada a esse problema artificial. Após essa etapa, se deve aplicar a solução do problema artificial para o problema original de três máquinas. Por fim, é necessário que se delete os tempos ociosos, deslocando os itens para a direita na segunda e terceira máquinas.

A segunda heurística dos autores, apresentada na rede como Heurística_NIR_Saadani_et_al., é uma adaptação da heurística de inserção do vizinho mais próximo para o problema de *Flow Shop* sem tempo ocioso. Nesse artigo os autores apontam que problemas com essa característica podem ser vistos como problemas do caixeiro viajante assimétrico.

O Quadro 11 traz os métodos heurísticos utilizados nos artigos pertencentes a esse estrato.

QUADRO 11 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) – PARTE II
(CONTINUA)

Autor	Método
Rajendran; Ziegler (2003)	Heurística de Rajendran-Ziegler; Heurística de Rajendran-Ziegler com IS; Heurística de Gelders-Sambandam; Heurística de Gelders-Sambandam com IS; Random Search Method; Multi Start Descent Method; Random Search Method com Multi Start Descent Method

QUADRO 11 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) – PARTE II (CONCLUSÃO)

Saadani et al. (2003)	Heurística de Saadani et al.; Heurística NIR de Saadani et al.
Daniels et al. (2004)	Heurística FSPRF
Gupta et al. (2004)	Algoritmo AH; Algoritmo de Gupta et al. (PTAS)
Ng; Kovalyov (2004)	FPTAS Partition Type Problem
Yeung et al. (2004)	Heurística H de Yeung et al.
Bouquard et al. (2005)	Algoritmo de Bouquard et al.; Algoritmo FPNWq; Algoritmo NW1
Grabowski; Pempera (2005)	Descending Search; Descending Search with Multimoves; NEH; Heurística de Rajendran
Kalczynski; Kamburowski (2005)	Heurística SGM; NEH; Heurística KK
Low (2005)	SPT; LPT; FCFS; FIX
Ravindran et al. (2005)	CR
Ronconi (2005)	NEH
Wang et al. (2005)	MLPT
Averbakh (2006)	Algoritmo de Averbakh
Chen (2006)	NEH
Chung et al. (2006)	SPT; EDD; MST; MCR; Montaigne's Ratio Method
Eren; Güner (2006)	Random; EDD; Johnson; NEH
Jin et al. (2006)	Johnson; SPT1; SPT2; SPT-12; LPT-12; LPT2;

FONTE: O Autor (2017).

5.9.4.4 Heurísticas – Parte III

Nessa parte final das heurísticas correlatas ao Quarto Período, tirante as regras de prioridade e algumas heurísticas consagradas, como NEH e Johnson, o cenário da prevalência de heurísticas autorais não se altera.

Em relação a estas heurísticas, há que se destacar o trabalho de Paternina-Arboleda et al. (2008) em que se propõe uma heurística baseada na Teoria das Restrições (TOC – *Theory of Constraints*). O problema resolvido pelos autores é multiestágio em um ambiente *Flow Shop* flexível. De modo geral, o algoritmo é dividido em três etapas: identificação do recurso gargalo, isto é, o estágio que tem a maior

taxa de fluxo, calculada pela razão entre a carga total de trabalho do estágio e a capacidade disponível total da linha; o sequenciamento dos itens no estágio gargalo, que deve ser sequenciado em ordem crescente das datas de liberação dos itens para o estágio gargalo; e sequenciamento dos estágios não-gargalo.

No Quadro 12, tem-se as heurísticas utilizadas nesse terceiro estrato do Quarto Período.

QUADRO 12 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) – PARTE III
(CONTINUA)

Autor	Método
Kalczynski; Kamburowski (2006)	Heurística de Kalczynski-Kamburowski
Liu et al. (2006)	Heurística de Rajendran; NEH
Jin et al. (2007)	NEH
Kalczynski; Kamburowski (2007b)	Algoritmo 1 KK; Algoritmo 2 KK; Algoritmo 3 KK
Kalczynski; Kamburowski (2007a)	NEH; Heurística Ho-Chang; Heurística SUL de Suliman; Heurística POU de Pour
Wang; Cheng (2007)	Algoritmo H de Wang-Cheng
Wang; Edwin Cheng (2007)	Heurística H1 de Wang-Cheng; Heurística H2 de Wang-Cheng
Chen; Pan; Lin (2008)	NEH; NDY; SPT/TWKR;
Chen; Pan; Wu (2008)	NEH
Pan et al. (2008)	NEH; MNEH; Heurística de Rajendran
Paternina-Arboleda et al. (2008)	Heurística baseada na TOC de Paternina-Arboleda et al.; Heurística SBG; Shifting Bottleneck Local Search
Shiau et al. (2008)	WSPT; WSPT-MCI; SPT; Geração de Colunas PFFS
Yang et al. (2008)	Algoritmo de Yang et al.
Al-Anzi; Allahverdi (2009)	EDD; Johnson
Chandra et al. (2009)	H1 de Chandra et al. (Caso 1); H1 de Chandra et al. (Caso 2); Heurística de Woo-Yin; Heurística de Rajendran-Ziegler; NEH
Choi; Lee (2009)	Heurística de 2 Fases de Choi-Lee; FS de Choi-Lee; SS de Choi-Lee; FP de Choi-Lee; SP de Choi-Lee; TP de Choi-Lee; Algoritmo de Gupta-Tunc; TS de Choi-Lee

QUADRO 12 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2010) – PARTE II
(CONCLUSÃO)

Choi; Kim (2009)	EDD; SLACK; SLACK/RMWK; MDD; MNEH; Greedy Local Search
Davoudpour; Ashrafi (2009)	TWK; Regra de Ruiz-Stützle
Ronconi; Henriques (2009)	FPDNEH de Ronconi-Henriques; NEH; LBNEH de Ronconi-Henriques

FONTE: O Autor (2017).

5.9.4.5 Outros métodos

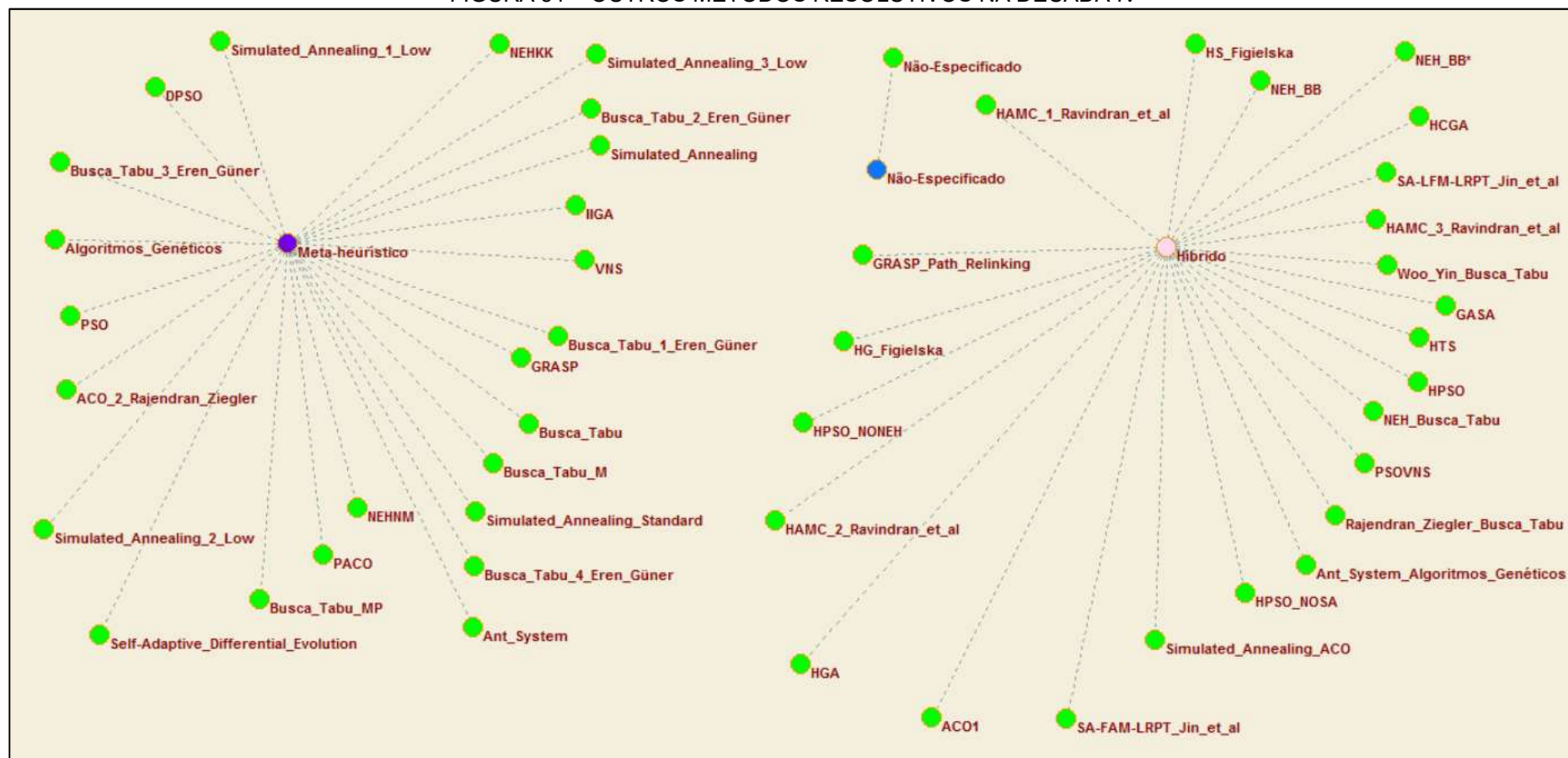
Em relação aos outros métodos, destaca-se a consolidação das hibridações na resolução de problemas de *Flow Shop*. Além disso, tem-se a presença de diversas meta-heurísticas também, ampliando a diversidade destas face à década anterior.

Em relação aos métodos híbridos, se pode citar como um exemplo de trabalho aqui classificado o estudo de T'Kindt et al. (2002), em que se combina as meta-heurísticas SA e Otimização por Colônia de Formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*), intitulada pelos autores como SACO. Estes resolveram um problema bicritério, em que se busca a minimização do *makespan* e do tempo de conclusão total, em uma abordagem hierárquica, sendo o *makespan* otimizado antes do tempo de conclusão total. Depois de uma série de testes, com instâncias de até 200 itens, os autores concluem que os resultados encontrados são melhores do que aqueles obtidos por outras heurísticas, como a TGB, proposta em T'Kindt, Gupta e Billaut (2002) e a INSERT, proposta por Gupta et al. (2001).

Em relação às meta-heurísticas, tem-se pela primeira vez a utilização da Otimização por Nuvem de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*). O artigo de Al-Anzi e Allahverdi (2009) é um exemplo desse uso. Além do PSO, os autores propõem outras duas meta-heurísticas para a resolução do *Flow Shop* com dois estágios, operações de montagem e bicritério (*lateness* máximo e *makespan*), a saber, a Busca Tabu e a Evolução Diferencial Auto-Adaptativa (SDE – *Self-adaptive Differential Evolution*).

A Figura 31 retrata os outros métodos resolutivos do Quarto Período.

FIGURA 31 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA IV



FONTE: O Autor (2016).

5.9.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Neste período foram registrados 468 métodos resolutivos, o equivalente a 43% do total utilizado durante os sessenta e um anos de *Flow Shop* a que esta dissertação estuda. Portanto, as redes foram estratificadas, criando-se redes individualizadas para cada tipo de método.

5.9.5.1 Métodos exatos

Nesse estrato a importância relativa dos métodos exatos, face aos demais tipos de métodos, se reduz. No entanto, ainda há uma quantidade considerável de metodologias exatas. Dentre os artigos que se dedicam ao estudo destas, há que se destacar a publicação de Gerstl e Mosheiov (2014), que utilizam 6 modelos de Programação Dinâmica. O problema resolvido pelos autores tem dois estágios, em ambiente flexível, com tempos unitários de execução dos itens e produção em lotes. Objetiva-se nesse estudo a minimização do *makespan* e do tempo de fluxo. Duas características distinguem esse trabalho dos demais já apresentados na literatura: permite-se um número qualquer de estações de trabalho em ambos os estágios; e não há restrição quanto ao número de lotes a ser processados em cada máquina. Além disso os modelos aqui trabalhados fazem considerações acerca do *setup*, que pode ser independente da máquina, em uma hipótese simplificadora, ou o tempo de preparação é dependente da máquina, caracterizando-se desse modo um problema mais geral.

O algoritmo de Programação Dinâmica 1, definido no artigo como DP1 é utilizado na otimização de um caso especial do modelo proposto. Nesse caso, o problema é formulado com uma máquina no estágio 1, duas máquinas paralelas idênticas no estágio 2, tempo de preparação não-dependente da máquina e com o objetivo de minimizar o *makespan*.

O algoritmo de Programação Dinâmica 2 (DP2) é usado na otimização de outro caso especial. Neste, há duas máquinas no estágio 1, três no estágio 2, tempo de preparação não-dependente da máquina, visando à minimização do *makespan*.

O algoritmo DP_{Cmax} é dedicado à resolução do caso geral, isto é, há em cada estágio um número arbitrário de máquinas, com *setup* não-dependente da máquina e a fim de minimizar o *makespan*.

O algoritmo DP3 utiliza os parâmetros de DP1, à exceção do tempo de preparação, que nesta ocasião é dependente da máquina. O critério de otimalidade é o mesmo que o empregado pelos algoritmos anteriores.

O algoritmo DP4 utiliza os parâmetros de DP1, só que o critério a ser aqui otimizado é o tempo de fluxo. Por fim, o algoritmo DP_{FT} lança mão dos parâmetros empregados em DP_{Cmax} , excetuando-se o critério a ser otimizado, que é o mesmo encontrado em DP4.

O Quadro 13 retrata esse período quanto aos métodos exatos.

QUADRO 13 – MÉTODOS EXATOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONTINUA)

Autor	Método
Easwaran et al. (2010)	Algoritmo de Easwaran et al.
Gong et al. (2010)	Formulação de Programação Quadrática Inteira Mista de Gong et al.; Programação Dinâmica
Lee et al. (2010)	Branch-and-bound
Liao; Huang (2010)	Formulação de Programação Inteira de Liao-Huang 1; Formulação de Programação Inteira de Liao-Huang 2; Formulação de Programação Inteira de Liao-Huang 3
Mosheiov; Sarig (2010)	Programação Dinâmica
Gong; Tang (2011)	Programação Dinâmica
Ng et al. (2010)	Branch-and-bound Ng et al.
Li et al. (2011)	Branch-and-bound
Cheng et al. (2012)	Formulação de Programação Inteira de Cheng-Lin-Huang
Javadian et al. (2012)	Formulação de Programação Inteira de Javadian et al.
Liao et al. (2012)	Branch-and-bound
Shabtay; Gasper (2012)	Algoritmo de Johnson Clássico; Algoritmo 7 de Shabtay-Gasper
Bochtis et al. (2013)	Abordagem de Numeração Exaustiva

QUADRO 13 – MÉTODOS EXATOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) (CONCLUSÃO)

Elyasi; Salmasi (2013)	Formulação de Programação Não-Linear de Elyasi-Salmasi; Formulação de Programação Linear de Elyasi-Salmasi
Gerstl; Mosheiov (2013)	Programação Dinâmica
Lin et al. (2013)	Branch-and-bound
Lin; Ying (2013)	Branch-and-bound de Ronconi
Moslehi; Khorasanian (2013)	Branch-and-bound; Formulação de Programação Inteira e Binária de Moslehi-Khorasanian 1; Formulação de Programação Inteira e Binária de Moslehi e Khorasanian 2
Wang; Wang (2013)	Branch-and-bound
Benavides et al. (2014)	Formulação de Programação Inteira de Benavides et al.
Cheng et al. (2014)	Formulação de Programação Inteira Mista de Cheng et al.
Della Croce et al. (2014)	Formulação de Programação Linear Inteira Mista de Della Croce-Grosso-Salassa
Gerstl; Mosheiov (2014)	Programação Dinâmica 1; Programação Dinâmica 2; Programação Dinâmica-Cmax; Programação Dinâmica 3; Programação Dinâmica 4; Programação Dinâmica-FT
Jeong; Kim (2014)	Branch-and-bound
Naderi et al. (2014)	Modelo 1 de Naderi-Gohari-Yazdani; Modelo 2 de Naderi-Gohari-Yazdani; Modelo 3 de Naderi-Gohari-Yazdani; Modelo 4 de Naderi-Gohari-Yazdani
Shabtay et al. (2014)	Algoritmo de Shabtay et al. 1; Algoritmo de Shabtay et al. 2; Algoritmo de Shabtay et al. 3; Algoritmo de Shabtay et al. 4; Algoritmo de Shabtay et al. 5
Xu et al. (2014)	Formulação de Programação Inteira Mista de Xu et al.
Samarghandi (2015)	Formulação de Programação Inteira de Samarghandi; Algoritmo Timetabling de Samarghandi
Yang (2015)	Algoritmo SO de Yang

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.2 Heurísticas – Parte I

Em relação às heurísticas, optou-se por dividir a análise destas em dois segmentos: o primeiro, a que essa seção se propõe a analisar trata dos métodos resolutivos dos primeiros 41 artigos, em ordem cronológica, aqui categorizados. A seção subsequente fará o mesmo com as 41 publicações restantes.

No tocante a esse estrato da análise, destaca-se o trabalho de El-Bouri (2012), que propõe uma regra de prioridade cooperativa, isto é, uma metodologia de resolução em tempo real que consulta as máquinas a jusante antes de qualquer decisão do sequenciamento de um item em uma dada máquina. O ambiente estudado pelo autor é um *Flow Shop* dinâmico e o objetivo é minimizar o atraso médio. O autor compara a abordagem proposta com regras clássicas de sequenciamento, gerando cenários com diferentes taxas de utilização do sistema. Estas seis regras clássicas são: COVERT – os itens são sequenciados em ordem decrescente da razão entre o custo atraso e o tempo de processamento; FIFO; Quantidade Total de Trabalho (TWK – *Total Work Content*); EDD; MDD; Data Modificada de Operação (MOD – *Modified Operation Date*); e Folga por Operação (SPO – *Slack per Operation*).

O Quadro 14 traz o panorama geral quanto ao uso de heurísticas na primeira parte do Quinto Período.

QUADRO 14 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I
(CONTINUA)

Autor	Método
Gong et al. (2010)	LPT-Last Only Not Full; Algoritmo H de Gong et al.; Algoritmo G de Gong et al.
Lee et al. (2010)	HA1 de Lee et al.; HA2 de Lee et al.; HA3 de Lee et al.; HA4 de Lee et al.
Liang et al. (2010)	NEH; Heurística de Inserção
Mosheiov; Sarig (2010)	Minimum Weighted Number of Tardy Blocks de Mosheiov-Sarig
Naderi et al. (2010)	SPT; Johnson; EDD; SLACK; EWDD
Ng et al. (2010)	Algoritmo A de Ng et al.
Gao et al. (2011)	NEH
Gong; Tang (2011)	Algoritmo H de Gong-Tang; Algoritmo S de Gong-Tang; Algoritmo First Fit Decreasing

QUADRO 14 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I
(CONTINUAÇÃO)

Lee et al. (2011)	EDD; SPT
Li et al. (2011)	SPT1; SPT2; SPT-12
Ng et al. (2011)	Algoritmo 1 de Ng et al.; Algoritmo 2 de Ng et al.; Algoritmo 3 de Ng et al.; Algoritmo 4 de Ng et al.; Algoritmo 5 de Ng et al.; Algoritmo 6 de Ng et al.; Algoritmo 7 de Ng et al.; Algoritmo 8 de Ng et al.
Ribas et al. (2011)	Heurística Baseada em NEH; Algoritmo de Busca em Descida Não-Exaustiva
Ahmadizar (2012)	Heurística de Palmer
Aydilek; Allahverdi (2012)	Algoritmo M de Aydilek-Allahverdi; Heurística A de Aydilek-Allahverdi
Deng; Gu (2012)	NEH; Heurística de Melhoria de Inserção
El-Bouri (2012)	Regra de Prioridade Cooperativa; FIFO; TWK; EDD; MDD; MOD; COVERT; Slack Per Operation
Mehta et al. (2012)	Heurística Adj Reduced de Mehta et al.; Heurística Adjacent de Sharma
Mosheiov; Oron (2012)	Algoritmo de Mosheiov-Oron
Shabtay; Gasper (2012)	Algoritmo 2 de Shabtay-Gasper; Algoritmo 3 de Shabtay-Gasper; Algoritmo 5 de Shabtay-Gasper; Algoritmo 6 de Shabtay-Gasper; Algoritmo 8 de Shabtay-Gasper
Wang et al. (2012)	MNEH; NEH
Almeder; Hartl (2013)	SPT1; SPT2; SPT-12
Aydilek; Allahverdi (2013)	Algoritmo AA de Aydilek-Allahverdi.; Algoritmo AA1 de Aydilek-Allahverdi; Algoritmo AA2 de Aydilek-Allahverdi; Algoritmo AA3 de Aydilek-Allahverdi; Algoritmo AA4 de Aydilek-Allahverdi; Algoritmo AA5 de Aydilek-Allahverdi; Johnson; Algoritmo de Yoshida-Hitomi
Božejko et al. (2013)	LPT; NEH; L(LPT); L(NEH)
Chou (2013)	LS; Permutation Schedules; FF; FF1; FF2; DELAY(SPT); DELAY(SCR); DELAY(SOC); DELAY(LTRPT); DELAY(STROC)
Elalouf et al. (2013)	FPTAS de Elalouf et al.
Elyasi; Salmasi (2013)	SPT; Earliest Adjusted Due Date

QUADRO 14 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I
(CONCLUSÃO)

Gao et al. (2013)	NEH; Heurística SD; Heurística de Bertolissi; PH1 de Aldowaisan-Allahverdi; Heurística de Laha
-------------------	--

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.3 Heurísticas – Parte II

No que diz respeito a esse período da análise, se pode citar o artigo de Framinan e Perez-Gonzalez (2015), em que se aborda a utilização de variantes estocásticas para métodos consagrados, como o NEH e também para outros métodos como o CDS/Talwar. Nesse trabalho o objetivo é a minimização do *makespan* esperado. Anterior a apresentação das heurísticas por eles estudadas, faz-se a criação de um procedimento para se estimar o *makespan* esperado.

Os métodos testados, considerando-se quando da implementação destes o procedimento do cálculo de estimativa para o *makespan*, foram: a versão estocástica de NEH, intitulada SNEH; a versão estocástica de CDS/Talwar; a versão determinística de NEH, usando como dados a média dos tempos de processamento das instâncias; a versão determinística de CDS/Talwar, usando como dados a média dos tempos de processamento das instâncias; a versão determinística de NEH, usando como dados a média dos tempos de processamento das instâncias, mas usando como solução inicial a sequência obtida pela CDS/Talwar, procedimento definido no artigo como NEH-Talwar.

Gerou-se diversos cenários, com diferentes níveis de coeficientes de variação (c) dos tempos de processamento e para problemas de até 20 itens e 20 máquinas. Os autores reportaram que em casos de média variabilidade ($c=1$), as instâncias mais pesadas chegaram a demorar quase 20 horas quando da resolução destas.

O Quadro 15 expõe o panorama das heurísticas na segunda parte do Quinto Período.

QUADRO 15 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II
(CONTINUA)

Autor	Método
Gerstl; Mosheiov (2013)	Rounding Procedure de Gerst-Mosheiov
Chang et al. (2013)	NEH
Lin et al. (2013)	Heurística G de Lin et al.
Liu et al. (2013)	SLACKRW; MNEH; MDD; SPT; EDD; SLACK
Moslehi; Khorasanian (2013)	NEH-WPT
Wang; Wang (2013)	Algoritmo Heurístico de Wang-Wang; MNEH
Ziaee (2013)	Heurística de Ziaee; PRMUT-1; PRMUT-2; NONPRMUT; NEH
Cheng et al. (2014)	Algoritmo de Duas Fases de Cheng et al.; Fully Pairwise Interchange Algorithm
Fernandez-Viagas; Framinan (2014)	NEH
Jeong; Kim (2014)	EDD; MEDD; MDD; MNEH; Modified Framinan-Leisten
Laha; Sapkal (2014)	Heurística de Laha-Sapkal; Heurística de Framinan et al.; PH1 de Aldowaisan- Allahverdi
Lee (2014)	Expected Estimation Method (EEM)-FIFO; EEM-SPT; EEM-EDD; EEM-SLACK; Estimation Method (EM)-FIFO; EM-SPT; EM- EDD; EM-SLACK; TWK; Jobs In Queue; JIBQ; Exponential Smoothed Flowtime
Liu; Lu (2014)	Algoritmo H Liu-Lu
Mao et al. (2014)	Relaxação Lagrangiana; ISLA; SSLA; Constraint Satisfaction Algorithm;
Moslehi; Khorasanian (2014)	NEH
Naderi et al. (2014)	NEH; Random
Naderi; Ruiz (2014)	NEH-1; NEH-2
Pan; Ruiz (2014)	NEH; Heurística FRB4(k) de Rad et al.
Xu et al. (2014)	Heurística H2 de Pan-Chen; Heurística H5 de Pan-Chen
Chen et al. (2015)	HBLS; NEH-T
Dasgupta; Das (2015)	NEH
Fernandez-Viagas; Framinan (2015a)	Heurística FL de Framinan-Leisten; A-NEH

QUADRO 15 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II
(CONCLUSÃO)

Fernandez-Viagas; Framinan (2015b)	NEH-EDD(TBft); NEH-EDD(TBit); NEH-EDD(TBit1); NEH-EDD(TBit2); NEH-EDD(TBct); NEH-EDD(TBet); NEH-EDD(TBms); NEH-EDD(TB(MS-TAILLARD,IT1)); NEH-EDD(TBRandom); Heurística de Gelders-Sambandam; Heurística de Potts-Van Wassenhove; Heurística de Hasija-Rajendran
Framinan; Perez-Gonzalez (2015)	S-NEH; Heurística S-CDS/Talwar; NEH; Heurística CDS/Talwar
Lin et al. (2015)	NEH
Ribas; Companys (2015)	HPF1; HPF2
Samarghandi (2015)	Random; EDD; Heurística Rajendran; Heurística de Samarghandi-El Mekkawy
Yang (2015)	Heurística GS de Gonzalez-Sahni; Heurística GR Gulosa de Yang

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.4 Métodos híbridos – Parte I

Dos 468 métodos do Quinto Período, 103 foram hibridações. Por conta disso, dividiu-se a análise desse tipo de método em duas partes. Sob o prisma dessa primeira parte, destaca-se o artigo de Czapinski (2010). Neste artigo, o autor combinou o SA com um mecanismo de melhoramento genético, método denominado SAwGE (*Simulated Annealing with Genetic Enhancement*).

O SAwGE é baseado em um algoritmo de agrupamento para SA, com o incremento do mecanismo de melhoramento genético, que é baseado em AG. Esse mecanismo é responsável por ajustar os parâmetros do SA de modo dinâmico. O autor testou seu método em 120 instâncias de Taillard. Em 118 delas o método empatou ou alcançou (em 81 dos 118 casos) os melhores resultados obtidos até aquele momento, configurando-se assim no estado da arte em métodos resolutivos para problemas de *Flow Shop*.

O Quadro 16 apresenta os métodos híbridos da primeira parte do Quinto Período.

QUADRO 16 – HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I

Autor	Método
Czapiński (2010)	SawGE de Czapinski; HGA; HGLS; Estimation Distribution Algorithm + VNS
Lee et al. (2010)	HA1-PI de Lee et al; HA2-PI de Lee et al.; HA3-PI de Lee et al.; HA4-PI de Lee et al.
Liang et al. (2010)	HDE
Naderi et al. (2010)	NEH-EWDD
Behnamian; Fatemi Ghomi (2011)	HMS de Behnamian-Fatemi Ghomi; Multi Objective Hybrid Algorithm
Behnamian; Zandieh (2011)	HTS de Wang-Tang; RBT de Liu et al.;
Engin et al. (2011)	Efficient GA de Engin et al.
Lee et al. (2011)	Branch-and-bound + Simulated Annealing
Ribas et al. (2011)	HDDE
Aydilek; Allahverdi (2012)	HH1 de Aydilek-Allahverdi; HH2 de Aydilek-Allahverdi
Chiou et al. (2012)	GA-EDD Cross-Flow Shop; GA-EDD-S; GA-FIFO-S; GA-FIFO-C
Deng; Gu (2012)	HDDE; NEHD; NEHDnsu; HDPSO; IG com Local Search; DDE com Is
Liao et al. (2012)	HPSO; PSO-SA; PSO-BH
Wang et al. (2012)	Algoritmo de Três Fases de Wang et al; HDDE; NEH-WPT
Chou (2013)	PSO-Cocktail Decoding Method
Dong et al. (2013)	hDDE; HGA-Z de Zhang; IG Referenced Local Search; DDE Referenced Local Search
Gao et al. (2013)	ISDH; IBH; IBH-Local Search; ISDH-Local Search; ISDH-iter; IBH-iter

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.5 Métodos híbridos – Parte II

Em relação à segunda parte da década, tem-se, assim como na primeira, uma grande diversidade de hibridações. Destas, se pode citar as hibridações propostas por Ribas e Companys (2015), que estudaram cinco em seu artigo. O problema abordado por eles foi um *Flow Shop* com bloqueio visando à minimização do tempo total de fluxo

As primeiras hibridações combina uma heurística construtiva denominada *Profile Fitting*, que foi desenvolvida com o objetivo de minimizar o tempo em que a

máquina fica parada, seja por conta do bloqueio, seja por conta do tempo ocioso, ou a soma de ambos, com a fase de inserção da heurística NEH, formando duas variantes: a NHPF1 e NHPF2.

A terceira e quarta hibridações são propostas pelos autores. Nestas, combina-se a meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) é combinada às heurísticas híbridas NHPF1 e NHPF2, formando as hibridações GRASP(NHPF1) e GRASP(NHPF2).

Por fim, a quinta hibridação é a combinação de NEH com SPT, formando NSPT. O Quadro 17 apresenta os métodos híbridos da segunda parte do Quinto Período.

QUADRO 17 – HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II
(CONTINUA)

Autor	Método
Chang et al. (2013)	SGA-NEH; PSO-MA; DDE Referenced Local Search; IG Referenced Local Search; HGA; puzzle-based-ACGA-Hybrid; H-CPSO
Lin; Ying (2013)	RAIS; HDDE; PAIS
Moslehi; Khorasanian (2013)	NEEH-MK
Ziaee (2013)	NED-EDD; NEH-EWDD; IG Referenced Local Search
Akhshabi et al. (2014)	PSO-MA
Benavides et al. (2014)	Scatter Search with Path Relinking
Della Croce et al. (2014)	SawGE de Czapinski
Fernandez-Viagas; Framinan (2014)	IG Referenced Local Search; IG-RIS
Karimi; Davoudpour (2014)	AG-VNS; MOGLS de Karimi-Davoudpour
Moslehi; Khorasanian (2014)	HVNS; hmgHS; TPA; NEH-WPT; HGA; HPSO; RAIS
Naderi et al. (2014)	PSO 3 de Naderi et al.
Naderi; Ruiz (2014)	NEH-df; HGA; VNS-Branch-and-bound
Nagano et al. (2014)	Evolutionary Clustering Search de Nagano et al.
Pan; Ruiz (2014)	HGA; HDDE de Pan-Wang; HDDE de Deng-Gu; HDPSO
Wang; Choi (2014)	Decomposition-based Holonic Approach; SPT-CNP
Chen et al. (2015)	HGA-RMA; NEGA-VNS; PSO-VNS
Dasgupta; Das (2015)	NEHrs

QUADRO 17 – HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II
(CONCLUSÃO)

Fernandez-Viagas; Framinan (2015)	BICH
Framinan; Perez-Gonzalez (2015)	NEH-Talwar
Lei (2015a)	NNMA; NSGA II
Lei (2015b)	Two Phase Neighborhood Search; NSGA II; L-NSGA II
Lin et al. (2015)	Hybrid Backtracking Search Algorithm; HQGA; HBSA-NOLS; HGA
Liou; Hsieh (2015)	Algoritmo Híbrido de Liou e Hsieh
Ribas; Companys (2015)	NHPF1; NHPF2; GRASP(NHPF1); GRASP(NHPF2); NSPT
Samarghandi (2015)	HPSO; GASA

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.6 Meta-heurísticas – Parte I

Dos 468 procedimentos resolutivos empregados no Quinto Período, 135 são meta-heurísticos. Portanto, dividiu-se a análise em duas partes.

No tangente ao primeiro estrato, se pode citar o trabalho de Naderi et al. (2010), que utilizou duas meta-heurísticas em sua publicação: a conhecida *Simulated Annealing* e o infrequente Algoritmo Eletromagnético. O problema tratado aqui é um *Flow Shop* que considera não desprezível os tempos de transporte entre as estações de trabalho e pondera sobre a possibilidade de alguns itens não passar por todas as máquinas (*stage skipping*). Os objetivos do estudo são a minimização do atraso total ponderado e do *makespan*.

O algoritmo eletromagnético (EMA – *Electromagnetism Algorithm*) é inspirado na Física, em que as partículas eletricamente carregadas são análogas às soluções em potencial dispersas pelo espaço de soluções. Esta meta-heurística utiliza um mecanismo de atração-repulsão para mover as partículas em direção à otimalidade.

Os autores consideram cada solução candidata como uma partícula carregada. A carga de cada candidata é relacionada ao valor da função objetivo. O tamanho da atração ou da repulsão exercida sobre cada candidata é calculada por essa carga. A direção desta carga para a candidata é determinada pela soma vetorial de cada uma das outras soluções na solução candidata. Neste mecanismo, uma candidata com

bom valor da função objetivo atrai as outras soluções; uma com valores ruins, as repele; e quanto maior o valor da função objetivo da solução candidata, maior é o tamanho da atração que esta exerce. Este algoritmo encontrou respostas melhores que aquelas obtidas pelo SA.

No Quadro 18, apresenta-se as meta-heurísticas correlatas à primeira parte do Quinto Período.

QUADRO 18 – META-HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I
(CONTINUA)

Autor	Método
Czapiński (2010)	VNS
Liang et al. (2010)	DMS-PSO; DMS-PSOnL; PSO; Busca Tabu-M; Busca Tabu
Liao; Huang (2010)	Busca Tabu de Armentano-Ronconi; Busca Tabu de Liao et al.; Busca Tabu 1 de Liao-Huang; Busca Tabu 2 de Liao-Huang
Naderi et al. (2010)	Algoritmo Eletromagnético; Simulated Annealing
Behnamian; Fatemi Ghomi (2011)	RNDSA; NSGA II
Behnamian; Zandieh (2011)	Colonial Competitive Algorithm
Engin et al. (2011)	PGA
Gao et al. (2011)	DHS; VNS; DHSnI; HS; AG; DDE; DPSO
Lee et al. (2011)	SA1 de Lee et al.; SA2 de Lee et al.; SA3 de Lee et al.; SA4 de Lee et al.
Li et al. (2011)	SA1 de Li et al.; SA2 de Li et al.; SA3 de Li et al.; SA Combinado de Li et al.
Ribas et al. (2011)	ILS
Ahmadizar (2012)	NACA; PACO; ACS; ACA; MMAS; M-MMAS
Aydilek; Allahverdi (2012)	Simulated Annealing; Modified Simulated Annealing
Javadian et al. (2012)	Algoritmo Imune F; Algoritmo Imune_Z
Liao et al. (2012)	ACO; AIS; QIA; PSO
Wang et al. (2012)	IG1; IG2
Almeder; Hartl (2013)	VNS Estocástico
Božejko et al. (2013)	Speed-up Method Tabu Search; Busca Tabu Paralelizada Single Walk; msTS de Bozejko et al (Multiple Walk); mpTS de Bozejko et al (Multiple Walk)

QUADRO 18 – META-HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE I
(CONCLUSÃO)

Chou (2013)	PSO Local Search; CDADS de Lahimet et al.; AG de Oguz-Ercan; PSO Local Search de Tseng-Liao; AG de Jouglet et al.; Algoritmos Miméticos de Jouglet et al.; Simulated Annealing de Wang; AG de Sivrikaya-Serifoglu-Ulsoy
Chung; Liao (2013)	IAIS de Chung-Liao; AIS; QIA; ACO; AG
Dong et al. (2013)	MRILS de Dong et al.; DABC;

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.7 Meta-heurísticas – Parte II

Nesse período, tem-se uma quantidade um pouco menor de métodos resolutivos aqui categorizados do que o verificado na subseção anterior. Destes métodos, se pode citar o artigo de Lei (2015).

Nesse artigo, o autor utiliza a meta-heurística Busca em Vizinhança Variável (VNS – *Variable Neighborhood Search*), para um modelo estocástico e com a presença de multi-agentes, em que o primeiro visava à minimização do *makespan*, enquanto o segundo minimiza o atraso total. Em seus testes, o autor comparou os resultados do VNS com aqueles obtidos pela implementação de um algoritmo mimético (NNMA no artigo) e de um algoritmo genético utilizado em modelos multicritérios intitulado NSGAI. Em comparação a ambos, o VNS se muito superior no que tange ao valor da função objetivo encontrado.

O Quadro 19 retrata as meta-heurísticas encontradas nos artigos concernentes à segunda parte do Quinto Período.

QUADRO 19 – META-HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II
(CONTINUA)

Autor	Método
Chang et al. (2013)	Puzzle-based ACGA; ACGA; ACO; SGA; PSO-SPV
Lin et al. (2013)	ILS
Lin; Ying (2013)	Busca Tabu-M; IG; IG*

QUADRO 19 – META-HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – PARTE II (CONCLUSÃO)

Xu et al. (2013)	SFLA; AG; ACS; PSO; Simulated Annealing 1; Simulated Annealing 2
Akhshabi et al. (2014)	AG
Naderi et al. (2014)	PSO 1 Naderi et al.; PSO 2 Naderi et al.
Naderi; Ruiz (2014)	Algoritmo Eletromagnético; Busca Tabu; IG; VND-A; VND-B; Scatter Search
Nagano et al. (2014)	TRIPS; ILS de Ruiz-Allahverdi; MA-RAI
Pan; Ruiz (2014)	IG de Pan-Ruiz; IG(4); IG(8); IG de Tasgetiren
Wang; Choi (2014)	AG-C
Xu et al. (2014)	Algoritmos Miméticos
Chen et al. (2015)	PACO
Dasgupta; Das (2015)	DISCS; DFA; PGA; AG; ACO; Simulated Annealing; PSO; Busca Tabu-sh; Busca Tabu-ns
Dong et al. (2015)	SAILS; MRSILS; PR-ILS; PR-IGA; EILS; ESAILS; VNS-4; DPSO
Fernandez-Viagas; Framinan (2015)	AG de Ruiz-Allahverdi; A-IGA
Lei (2015)	VNS
Lin et al. (2015)	AG Simples; AG Melhorados
Liou; Hsieh (2015)	PSO; AG
Ribas; Companys (2015)	DABC; Harmony Search
Samarghandi (2015)	PSO; VNS; Busca Tabu; Busca Tabu-M; Busca Tabu-MP; Discrete Search; Discrete Search with Multimoves

FONTE: O Autor (2017).

5.9.5.8 Outros métodos

Em relação aos outros métodos, há pouco a se mencionar, posto que se tem apenas sete métodos aqui classificados, uma ínfima parte se comparado aos demais tipos de métodos. A se ressaltar aqui o trabalho de Della Croce, Grosso e Salassa (2014) que faz uso de uma *math-heuristic* que combina uma busca em feixe (*beam search*), cuja solução é reotimizada por um modelo de Programação Linear Inteira Mista.

Em suma, o que se pode perceber ao longo do estudo realizado à luz dos métodos resolutivos é a infinidade de métodos já criados ou utilizados quando da resolução de problemas de *Flow Shop*. Cabe ressaltar três pontos, um em retrospecto do estudo feito e os demais apontando para uma direção futura. Em relação ao primeiro, nota-se a prevalência das heurísticas sobre os demais métodos resolutivos. Contudo, na maioria dos casos, estas são autorais e restritas ao artigo em que são propostas.

Em relação à pesquisa futura, nota-se que as hibridações são cada vez mais recorrentes na resolução de problemas de *Flow Shop*. Outro ponto a se destacar é possibilidade de se utilizar *math-heuristics*, posto que apenas um artigo em um conjunto universo de 240 utilizou tal método. Uma possível razão para tal inaudito uso repousa na complexidade de tal implementação e no custo computacional que é despendido nesse tipo de método.

5.10 PERIÓDICOS

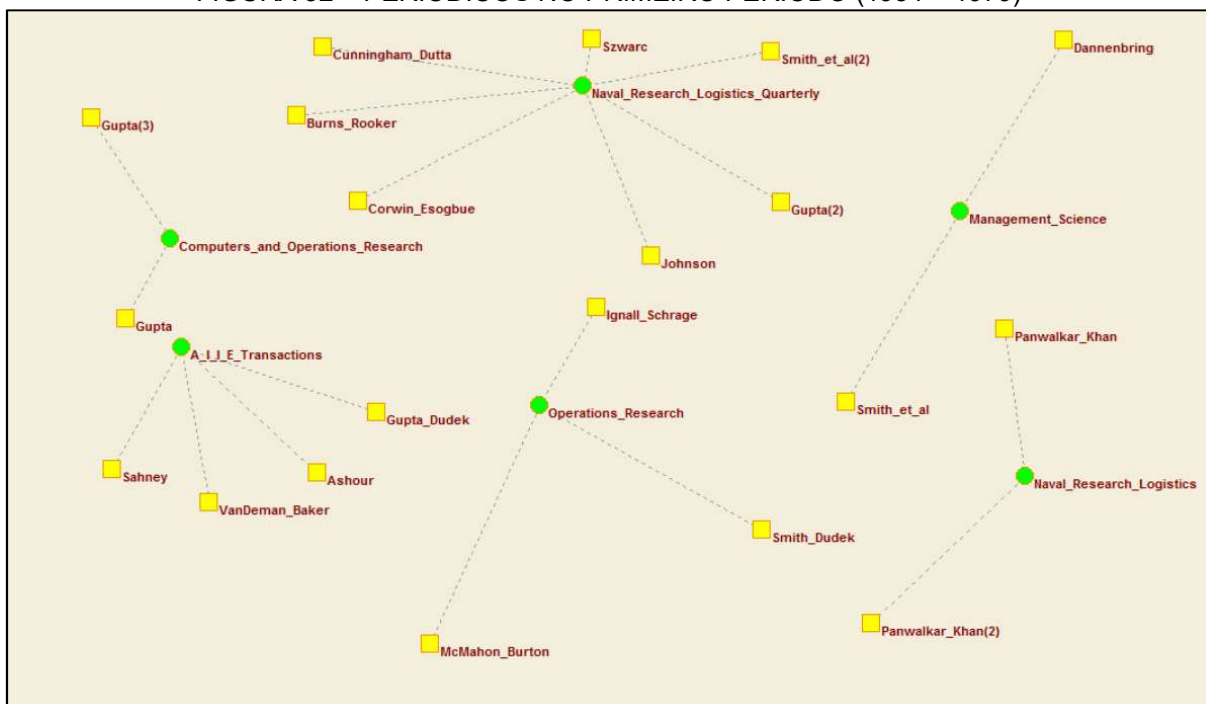
Faz-se a análise dos periódicos, estatificando-a em cinco períodos, nos moldes das métricas anteriores. Em relação às redes, os quadrados amarelos simbolizam os autores e o círculos verdes os periódicos. Cabe reiterar que os periódicos, quando do período em que realizou-se a coleta e leitura dos artigos, estavam ranqueados nas categorias Q1 e Q2 do SCImago Journal and Country Rank.

5.10.1 Primeiro Período (1954 – 1979)

Os artigos correlatos a esse período estão restritos a um grupo seletivo de apenas seis periódicos. Dentre estes, destaca-se a *Naval Research Logistics Quarterly* que contém sete dos vinte artigos aqui categorizados, dentre eles o seminal artigo de Johnson (1954). Se levarmos em conta que a *Naval Research Logistics* é o nome atual da *Naval Research Logistics Quarterly*, tem-se então 9 dos 20 trabalhos nestes periódicos.

Em relação aos autores do período aquele que mais publicou foi Gupta. Este foi autor principal ou co-autor de quatro dos vinte artigos aqui arrolados. Em outro aspecto, correlato a quem publicou em mais de um periódico, tem-se três autores: Gupta, Dudek e Smith. A Figura 32 retrata esse estrato temporal.

FIGURA 32 – PERIÓDICOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1954 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

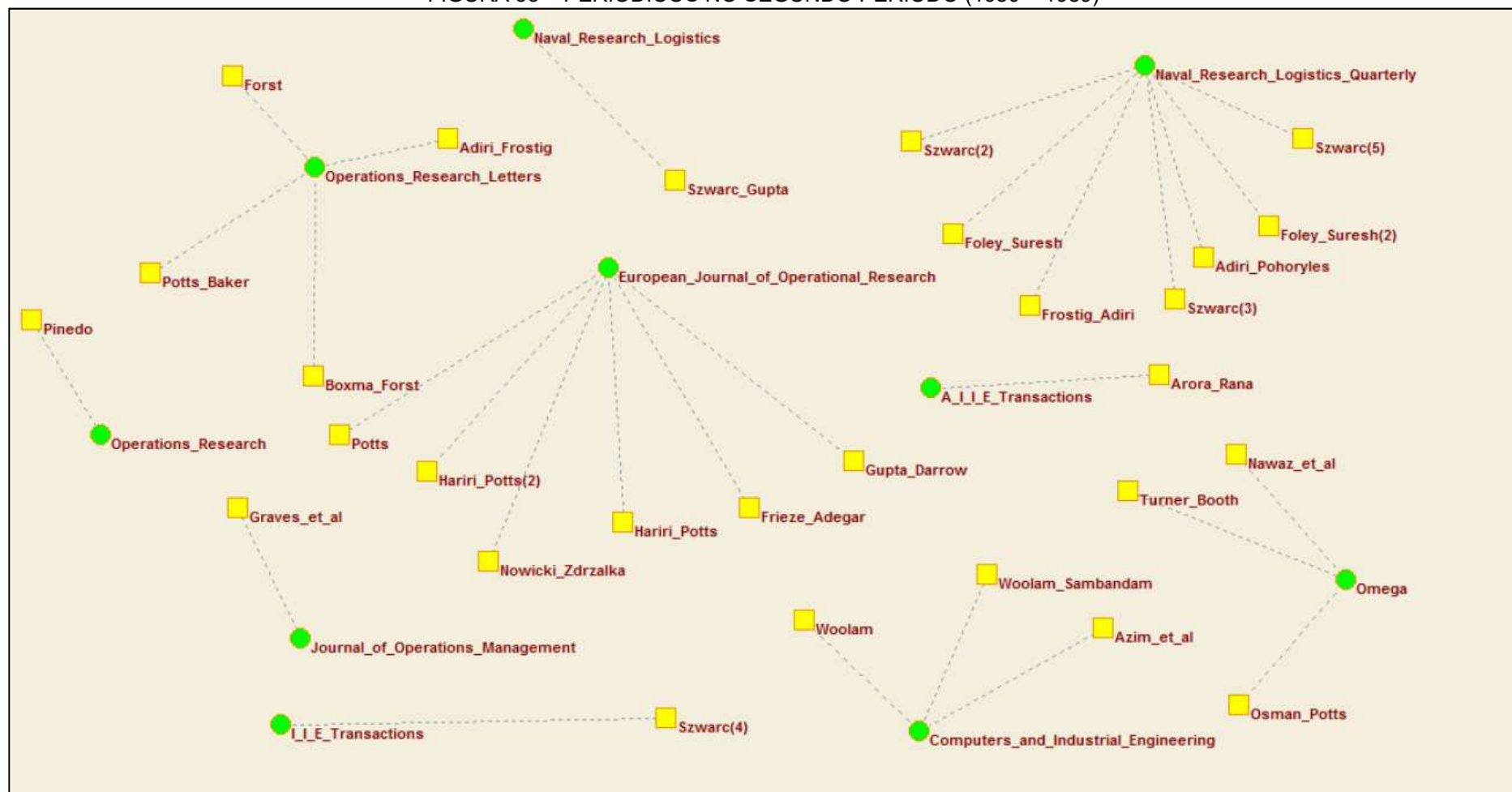
5.10.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Nesse período, o número de periódicos aumentou para dez. Dentre estes, há que se destacar o *European Journal of Operational Research* (EJOR), um dos principais jornais acadêmicos dentro da Pesquisa Operacional, que a partir dessa década, tem artigos publicados no que tange aos estudos arrolados na presente revisão. Além desta publicação, outro periódico que a partir dessa década passa a conter um razoável número de artigos de *Flow Shop* é o *Computers and Industrial Engineering*. Convém ressaltar ainda que a principal heurística do período, a NEH foi publicada na *Omega*, por Nawaz, Ensore e Ham (1983).

Em relação aos autores, aquele que mais publicou foi Szwarc, com cinco artigos. Destes, quatro foram publicados na *Naval Research Logistics Quarterly* e um na *IIE Transactions*. Dentre os autores que publicaram em mais de um periódico se

pode citar também Potts, que foi autor ou co-autor de artigos publicados na EJOR, na *Omega* e na *Operations Research Letters*. A Figura 33 retrata a rede representativa desse período.

FIGURA 33 – PERIÓDICOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989)



FONTE: O Autor (2016).

5.10.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Nesse período, há um considerável aumento no número de artigos (51) face ao encontrado nos dois períodos anteriores. Com o aumento de artigos, veio também o aumento de periódicos, que passou para 13. A se destacar a predominância da EJOR em relação aos demais periódicos, com quinze dos cinquenta e um trabalhos nela publicados. Outro periódico com bastantes publicações é a *Computers & Industrial Engineering*, com sete.

Dentre os autores, aquele que mais publicou foi Rajendran, com cinco artigos, sendo autor ou co-autor destes. Ele também é o autor que mais publicou em periódicos diferentes. Dos 13 correlatos a esse estrato temporal, ele publicou em quatro destas (*Naval Research Logistics*, EJOR, *International Journal of Production Economics* e *Computers and Industrial Engineering*). A Figura 34 retrata esse período.

FONTE: O Autor (2016).

5.10.4 Quarto Período (2000 – 2010)

Neste período, fazem parte da presente revisão 69 artigos, que foram publicados em 17 periódicos distintos. Nesse período persiste a prevalência da EJOR sobre as demais, com 16 dos 69 artigos nela publicados. Na sequência, vem a *Computers and Operations Research*, com exatamente a metade. Dentre as revistas que apareceram pela primeira vez nessa década tem-se a *Applied Mathematics and Computation* e a *Expert Systems with Applications*.

Em relação aos autores, os que mais publicaram foram Kalczynski e Kamburowski, que escreveram um em parceria com o outro quatro artigos. A se destacar também a presença de pesquisadores brasileiros, como Ronconi, que ao lado de Armentano já havia publicado na década passada e que nessa década publicou mais dois artigos: um na *Omega*, cujo co-autor é Henriques, em 2009 e outro na *Annals of Operations Research*, em 2005. A Figura 35 traz a rede representativa desse período.

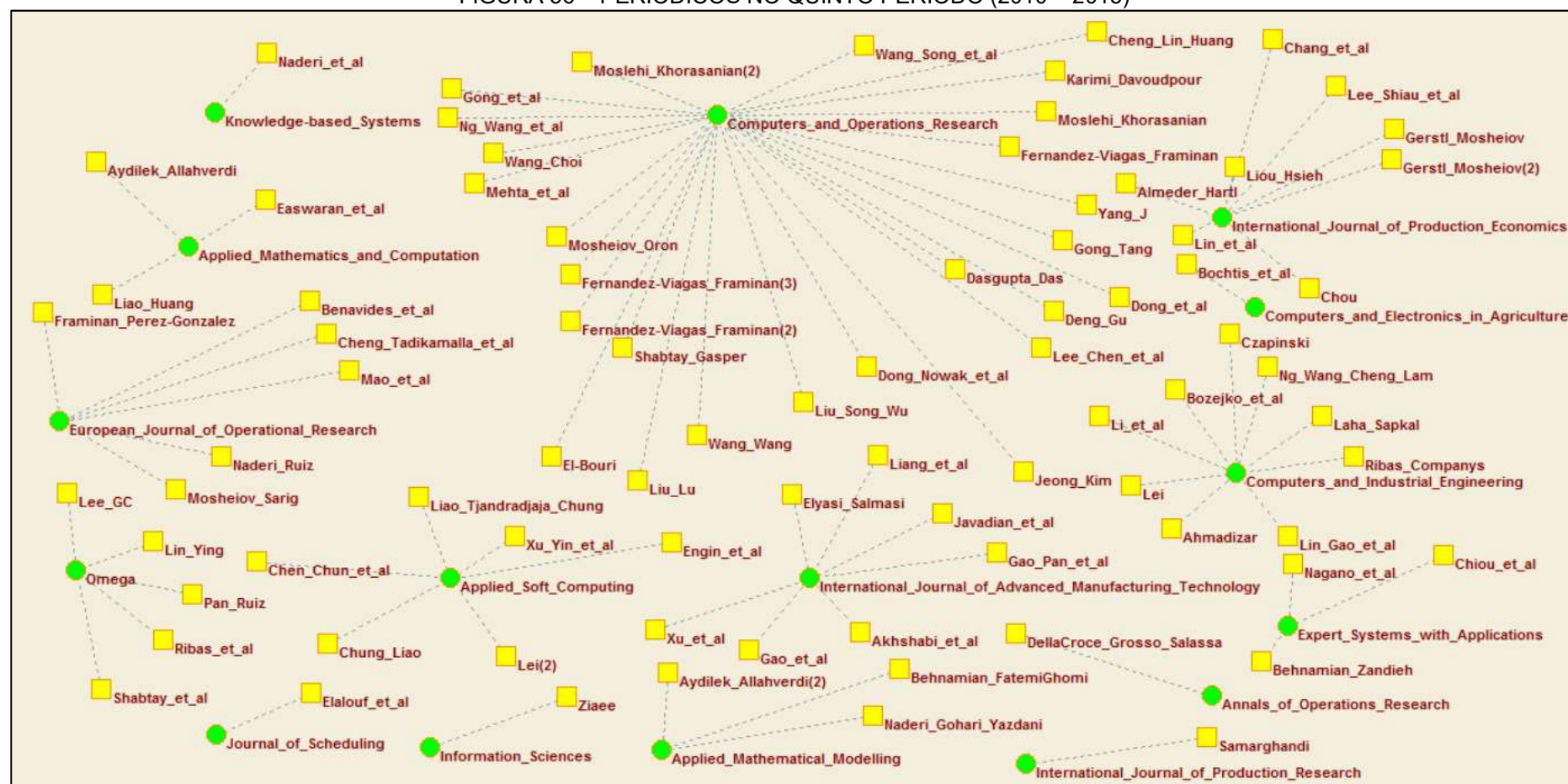
FONTE: O Autor (2016).

5.10.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Nesse período, tem-se a maior quantidade de artigos publicados (82). Estes foram publicados em 16 periódicos diferentes. No que concerne aos periódicos, a *Computers and Operations Research* tem 26 dos artigos aqui categorizados nela publicados. Há que se ressaltar também nenhum dos artigos arrolados foi publicado na *Naval Research Logistics*. Dentre os periódicos que apareceram pela primeira vez, estão a *Applied Soft Computing* e a *Computers and Electronics in Agriculture*.

Em relação aos autores, aquele que mais publicou foi Framinan, que foi autor ou co-autor de quatro artigos. A se destacar também novamente a presença de pesquisadores brasileiros: Nagano et al. (2014), que publicaram na *Expert Systems with Applications* e Benavides e Ritt, que ao lado do pesquisador espanhol Miralles, publicaram na EJOR em 2014. A Figura 36 retrata esse período.

FIGURA 36 – PERIÓDICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015)



FONTE: O Autor (2016).

Em suma, no que tange aos periódicos, aquele que mais publicou foi a EJOR, com 43 dos 250 artigos nela publicados. Outro ponto a se destacar é que a Programação da Produção é um tema muito plural quanto as áreas que se detem ao estudo dela. Há no espectro de periódicos pesquisados revistas mais voltadas à Engenharia, outras correlatas à Matemática Aplicada, à Pesquisa Operacional, à Administração, à Economia, à Ciência de Computação, entre outras. Com um espectro tão amplo de periódicos, cabe aos pesquisadores que submeterão artigos para estes periódicos a exata definição de que nicho seu trabalho está inserido e se este faz parte do rol de temáticas que o periódico escolhido abarca.

5.11 QUADRO-SÍNTESE DE *FLOW SHOP*

Após o exame extenso de todas as métricas propostas à luz da Programação da Produção em *Flow Shop*, o Quadro 20 apresenta um resumo de tudo que fora apresentado em redes, gráficos ou tabelas, acerca das métricas escrutinizadas nas seções anteriores.

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continua)

QUADRO 29 - CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE PESQUISA DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continua)																			
	Tipo Artigo			Classe Prog. Prod.		Modo Chegada Itens		Natureza Geração Dados					Tipo Métodos						
Autores	Problemas	Complexidade	Comparação	Off-line	On-line	Estático	Dinâmico	Determinístico	Estocástico	Determinístico/Estocástico	Característica dos Itens	Critérios de Otimalidade	Exato	Heurístico	Meta-heurístico	Híbrido	Não-Especificado	Simulação	Math-heuristic
Johnson (1954)	X			X		X		X			Clássico	Makespan	X						
Ignall; Schrage (1965)	X		X	X		X		X			Clássico	Tempo médio conclusão; Makespan	X						
McMahon; Burton (1967)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan	X						
Smith; Dudek (1967)	X			X		X		X			Clássico	Makespan	X						
Ashour (1970)	X			X		X		X			Clássico	Makespan		X					
Gupta; Dudek (1971)	X		X	X		X		X			Setup	Custo total de oportunidade; Custo de espera mais custo de ociosidade; Penalidade mais custo de ociosidade; Custo de espera; Penalidade; Custo da Ociosidade; Makespan		X				X	
Sahney (1971)	X			X		X		X			Tempos transferência; Único operador; Preempção; Inserção tempo ocioso	Tempo médio de fluxo		X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Cunningham; Dutta (1973)	X			X		X			X		Tempos de processamento exponenciais	Makespan esperado		X					
Corwin; Esogbue (1974)	X			X		X					Setup dependente da sequência em uma das máquinas	Makespan	X						
Van Deman; Baker (1974)	X			X		X					Sem espera	Tempo médio de fluxo	X	X					
Burns; Rooker (1975)	X			X		X					Clássico	Makespan	X						
Gupta (1975)	X		X	X		X					Setup	Custo total de oportunidade		X					
Panwalkar; Khan (1975)	X		X	X		X					Clássico	Makespan	X						
Smith et al. (1975)	X			X		X					Tempos de processamento ordenados	Makespan	X						
Gupta (1976)	X		X	X		X					Sem espera	Soma ponderada da ociosidade de todas as máquinas					X		
Smith et al. (1976)	X			X		X					Tempos de processamento ordenados	Makespan	X						
Dannenbring (1977)	X		X	X		X					Clássico	Makespan		X					
Panwalkar; Khan (1977)	X			X		X					Tempos de processamento ordenados	Makespan	X						
Szwarc (1977)	X			X		X					Clássico	Makespan		X					
Gupta (1979)	X			X		X					Clássico	Makespan		X					
Arora; Rana (1980)	X	X		X		X					Sem espera; Tempos de processamento semiordenados	Makespan	X						
Potts (1980)	X		X	X		X					Permutacional	Makespan	X						

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Szwarc (1981a)	X			X		X		X			Sem espera	Tempo de ociosidade; Tempo de espera; Soma ponderada tempo de envolvimento de todas as máquinas					X		
Szwarc (1981b)	X			X		X		X			Clássico	Tempo de ociosidade; Makespan					X		
Adiri; Pohoryles (1982)	X	X		X		X		X			Sem tempo ocioso; Sem espera	Soma dos tempos de conclusão		X					
Pinedo (1982)	X			X		X			X		Clássico; Bloqueio	Makespan esperado		X					
Forst (1983)	X			X		X			X		Clássico	Custo total esperado					X		
Graves et al. (1983)	X			X		X		X			Recirculação	Minimização WIP		X				X	
Nawaz et al. (1983)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan		X					
Szwarc (1983a)	X			X		X		X			Clássico	Tempo médio de conclusão					X		
Szwarc (1983b)	X			X		X		X			Sem espera	Tempo de conclusão		X					
Adiri; Frostig (1984)	X				X	X			X		Permutacional	Minimização da distribuição de probabilidade do makespan					X		
Foley; Suresh (1984)	X			X		X			X		Bloqueio	Makespan esperado		X					
Hariri; Potts (1984)	X		X	X		X		X			Restrições de precedência	Makespan	X	X					
Frostig; Adiri (1985)	X			X		X			X		Clássico	Minimização da distribuição da probabilidade do makespan					X		

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Woollam; Sambandam (1985)	X		X	X		X		X			Clássico	Minimização dos custos de atraso e estocagem		X					
Boxma; Forst (1986)	X			X		X				X	Datas de entrega	Número esperado ponderado de itens atrasados					X		
Foley; Suresh (1986)	X			X		X				X	Bloqueio; Itens sem overlapping; Itens estocásticos	Makespan esperado		X					
Gupta; Darrow (1986)	X	X	X	X		X				X	Setup dependente da sequência	Makespan		X					
Woollam (1986)	X		X	X		X		X			Sem tempo ocioso	Makespan		X					
Szwarc; Gupta (1987)	X	X	X	X		X		X			Setup aditivo dependente da sequência	Makespan		X					
Turner; Booth (1987)			X	X		X		X			Clássico	Makespan		X					
Nowicki; Zdrzałka (1988)	X	X			X	X		X			Tempos de processamento controláveis	Custo total de processamento mais custo do tempo máximo de conclusão		X					
Azim et al. (1989)	X			X		X		X			Clássico	Makespan						X	
Frieze; Yadegar (1989)	X			X		X		X			Permutacional	Makespan	X	X					
Hariri; Potts (1989)	X	X	X	X		X		X			Datas de entrega; Permutacional	Número de itens atrasados	X	X					
Osman; Potts (1989)	X		X	X		X		X			Permutacional	Makespan		X	X				
Potts; Baker (1989)	X			X		X		X			Overlapping; Lot Streaming; Sublotes consistentes	Makespan						X	
Daniels; Chambers (1990)	X		X	X		X		X			Datas de entrega	Makespan (bi-objetivo - BO); Atraso máximo (BO)	X						

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Ewacha et al. (1990)	X	X		X		X			Restrições de precedência; Tempos de processamento idênticos; Permutacional	Tempo ponderado de conclusão; Atraso total; Número de itens atrasados					X		
Matsuo (1990)	X	X		X		X			Sem espera; Espera mínima	Tempo total de espera; Minimização do tempo de ciclo	X	X					
Rajendran; Chaudhuri (1990)	X		X	X		X			Sem espera	Tempo total de fluxo		X					
Taillard (1990)	X	X	X	X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Ho; Chang (1991)	X		X	X		X			Clássico	Makespan; Tempo médio de fluxo; Utilização média		X				X	
Wemmerlöv; Vakharia (1991)	X		X	X		X		X	Setup da família de produtos; Datas de entrega	Tempo médio de fluxo; Razão entre itens adiantados e itens atrasados		X				X	
Hunsucker; Shah (1992)	X		X	X		X		X	Limite de itens ao mesmo tempo no sistema	Atraso médio; Número de itens atrasados		X				X	
Rajendran; Chaudhuri (1992)	X		X	X		X			Clássico	Tempo total de fluxo		X					
Simons (1992)	X		X	X		X		X	Setup dependente da sequência	Makespan		X					
Daniels; Mazzola (1993)	X		X	X		X		X	Tempos de processamento das operações dependente da quantidade de recursos	Makespan			X				
Karabati; Kouvelis (1993)	X		X	X		X		X	Permutacional	Soma dos tempos de conclusão	X	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Lee et al. (1993)	X	X		X		X		X		Operações de montagem	Makespan	X	X				
Rajendran (1993)	X		X	X		X		X		Clássico	Tempo total de fluxo		X				
Sarin; Lefoka (1993)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan		X				
Tsubone et al. (1993)	X		X	X		X	X	X		Lot Splitting; Setup; Datas de entrega	SETUP; GOAL; STOCK		X				
Vempati et al. (1993)	X		X	X		X		X		Clássico	Tempo total de fluxo	X	X	X			
Wagneur; Sriskandarajah (1993)	X		X	X		X		X		Tempos de processamento dependentes do estado; Tempos de processamento intrínsecos; Permutacional	Makespan	X	X				
Daniels; Mazzola (1994)	X	X	X	X		X		X		Flexibilidade de recursos; Tempos de processamento das operações	Makespan	X	X				
Gangadharan; Rajendran (1994)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan (BO); Tempo total de fluxo (BO)		X	X			
Gim et al. (1994)	X		X	X		X		X		Restrições de precedência esparsas	Makespan	X	X				
Gupta; Tunc (1994)	X			X		X		X		Setup separado do processamento; Remoção separado do processamento	Makespan – principal; Minimização do número de máquinas utilizadas por estágio - secundário		X				
Lim; McMahon (1994)	X			X		X		X		Relações de precedência arbitrárias	Makespan	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Baker (1995)	X			X		X		X		Lot Streaming; Overlapping; Janelas de tempo; Setup	Makespan	X					
Caffrey; Hitchings (1995)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan		X				X
Ching-Jong Liao et al. (1995)	X		X	X		X		X		Máquinas flexíveis	Makespan	X	X				
Ishibuchi et al. (1995)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan		X	X			
Kim (1995)	X		X	X		X		X		Datas de entrega; Permutacional	Atraso total	X	X				
Raman (1995)	X		X	X		X		X		Datas de entrega itens; Datas de entrega operações; Datas de liberação	Atraso total; Proporção de itens atrasados; Tempo total de fluxo		X				
Zegordi et al. (1995)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan		X	X			
Allahverdi; Tatari (1996)	X		X	X		X		X		Quebras aleatórias de máquinas	Makespan		X				X
Chen et al. (1996)	X		X	X		X		X		Sem espera	Tempo total de fluxo		X	X			
Della Croce et al. (1996)	X		X	X		X		X		Clássico	Tempo total de conclusão	X	X				
Glass; Potts (1996)	X		X	X		X		X		Clássico	Tempo ponderado total de conclusão		X	X	X		
Nagar et al. (1996)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan (BO); Tempo médio de fluxo (BO)	X	X	X	X		
Nowicki; Smutnicki, Czesław (1996)	X		X	X		X		X		Permutacional	Makespan		X	X			
Ramalhinho Lourenço (1996)	X	X	X	X		X		X		Clássico	Makespan	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Kim et al. (1997)	X			X		X				Lotes de transferência; Setup não separado do processamento; Setup separado do processamento	Makespan	X						
Levner et al. (1997)	X	X		X		X				Sem espera; Datas de liberação; Datas de entrega	Minimização do tempo de ciclo		X					
Rajendran; Ziegler (1997)	X		X	X		X				Setup dependente da sequência	Soma do tempo ponderado de fluxo		X					
Ben-Daya; Al-Fawzan (1998)	X		X	X		X				Clássico	Makespan		X	X				
Chen; Steiner (1998)	X	X		X		X				Lot Streaming; Overlapping; Setup dependente do item	Makespan					X		
Jia (1998)	X			X		X			X	Quebras de máquinas; Bloqueio	Minimização da variação esperada dos tempos de espera até o processamento se iniciar na segunda máquina					X		
Portmann et al. (1998)	X		X	X		X				Clássico	Makespan	X	X		X			
Shakhlevich et al. (1998)	X	X		X		X				Proporcional	Tempo ponderado total de conclusão	X						
Allahverdi (1999)	X			X		X			X	Quebras aleatórias de máquinas; Sem espera; Bloqueio; Itens resumíveis	Tempo total de fluxo		X					
Armentano; Ronconi (1999)	X		X	X		X				Datas de entrega	Atraso total	X	X	X				

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Averbakh; Berman (1999)	X	X		X		X		X		Máquinas transportadas aos itens	Makespan		X					
Cheng; Shakhlevich (1999)	X			X		X		X		Proporcional; Tempos de processamento controláveis; Tempos de processamento comprimíveis	Makespan (BO); Função linear de custo (BO); Soma do makespan e do custo de compressão	X	X					
Espinouse et al. (1999)	X	X		X		X		X		Sem espera; Disponibilidade limitada da máquina; Número arbitrário de buracos na máquina	Makespan		X					
Rios-Mercado; Bard (1999)	X			X		X		X		Setup dependente da sequência; Permutacional	Makespan	X						
Cheng et al. (2000)	X	X		X		X		X		Sem espera; Todos os itens com mesmo tempo de processamento na segunda máquina; Duas máquinas idênticas no segundo estágio	Makespan	X	X					
Della Croce et al. (2000)	X			X		X		X		Datas de entrega comuns	Número de itens atrasados	X						
Hong; Wang (2000)	X				X	X			X	Tempos de processamento difusos	Tempo total de conclusão		X					
Koulamas; Kyparisis (2000)	X	X		X		X		X		Clássico	Makespan		X					
Moursli; Pochet (2000)	X	X	X	X	X	X		X		Datas de liberação; Sem espera	Makespan	X	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Sidney et al. (2000)	X			X		X		X		Setup antecipado	Makespan		X					
Suliman (2000)	X		X	X		X			X	Permutacional	Makespan		X					
Allahverdi; Savsar (2001)	X			X		X			X	Proporcional; Quebras aleatórias de máquinas; Setup separado do processamento	Makespan		X					
Azizoğlu et al. (2001)	X		X	X		X		X		Clássico	Tempo total de fluxo	X	X					
Néron et al. (2001)	X		X	X		X		X		Janelas de tempo das datas de liberação; Janelas de tempo para os deadlines; Restrição de recursos	Makespan	X						
Soewandi; Elmaghraby (2001)	X	X	X	X		X		X		Clássico	Makespan		X					
Yokoyama (2001)	X			X		X		X		Operações de montagem	Soma ponderada dos tempos de conclusão de cada produto	X						
Alcaide et al. (2002)	X		X	X	X	X		X	X	Quebras aleatórias de máquinas; Tempos de reparo aleatórios; Tempos de processamento aleatórios	Makespan esperado		X					
Çeppek et al. (2002)	X	X		X		X		X		Sem espera; Sem tempo ocioso; Máquinas dominantes crescentes; Máquinas dominantes decrescentes	Não-especificado					X		

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Chung et al. (2002)	X	X	X	X		X		X			Permutacional	Tempo total de fluxo	X						
Della Croce et al. (2002)	X		X	X		X		X			Clássico	Tempo total de conclusão	X						
Framinan et al. (2002)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan (BO); Tempo total de fluxo (BO)		X					
Sung; Kim (2002)	X		X	X			X	X			Lotes; Datas de liberação; Preempção; Sem preempção; Máquina com tempo de processamento discreto	Makespan	X	X					
T'kindt et al. (2002)	X	X		X		X		X			Clássico	Makespan primeiro (BO); Tempo total de conclusão segundo (BO)		X		X			
Allahverdi; Sotskov (2003)	X				X	X			X		Tempos de processamento aleatórios; Tempos de processamento limitados	Makespan					X		
Bulfin; M'Hallah (2003)	X		X	X		X		X			Clássico	Número ponderado de itens atrasados	X	X					
Hou; Hoogeveen (2003)	X	X		X		X		X			Proporcional; Tempos de processamento ordenados; Velocidades desiguais das máquinas	Makespan	X						

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Oğuz et al. (2003)	X		X	X		X		X		Processadores paralelos idênticos; Múltiplos processadores por tarefa	Makespan	X	X				
Rajendran; Ziegler (2003)	X		X	X		X		X		Setup dependente da sequência; Datas de entrega	Tempo ponderado de fluxo; Atraso ponderado		X				
Saadani et al. (2003)	X	X	X	X		X			X	Sem tempo ocioso	Makespan		X				
Daniels et al. (2004)	X			X		X		X		Flexibilidade parcial de recursos; Tempo de processamento dependente do número de trabalhadores	Makespan	X	X				
Gupta et al. (2004)	X	X		X		X		X		Operação flexível; Setup dependente do item	Makespan		X				
Haq et al. (2004)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan			X	X		
Huq et al. (2004)	X			X		X		X		Setup; Lot Streaming	Makespan; Tamanho da força de trabalho; Cronograma	X					
Ng; Kovalyov (2004)	X	X		X		X		X		Indisponibilidade da máquina; Itens resumíveis	Makespan	X	X				
Tseng et al. (2004)		X	X	X		X		X		Permutacional	Makespan	X					
Yeung et al. (2004)	X			X		X		X		Janelas de tempo	Atrasos e adiantamentos	X	X				
Błażewicz et al. (2005)	X	X		X		X		X		Datas de entrega comuns	Atraso do trabalho ponderado total	X					
Bouquard et al. (2005)	X	X		X		X		X		Sem espera; Itens regulares	Makespan	X	X				

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Grabowski; Pempera (2005)	X		X	X		X		X			Sem espera	Makespan		X	X	X			
Kalczynski; Kamburowski (2005)	X		X	X		X		X			Sem tempo ocioso; Permutacional	Makespan		X					
Low (2005)	X		X	X		X		X			Setup independente da sequência; Remoção dependente da sequência	Tempo total de fluxo		X	X				
Rajendran; Ziegler (2005)	X		X	X		X		X			Permutacional	Tempo total de fluxo			X	X			
Ravindran et al. (2005)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan (BO); Tempo total de fluxo (BO)		X		X			
Ronconi (2005)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Makespan	X	X					
Wang et al. (2005)	X	X		X		X		X			Sem tempo ocioso; Sem espera	Makespan		X					
Averbakh (2006)	X	X			X	X			X		Tempos de processamento incertos; Permutacional	Makespan		X					
Chen (2006)	X		X	X		X		X			Recirculação; Permutacional	Makespan	X	X					
Chung et al. (2006)	X		X	X		X		X			Permutacional	Atraso total	X	X					
Eren; Güner (2006)	X		X	X		X		X			Setup separado do processamento	Soma ponderada do tempo total de conclusão (BO); Atraso total (BO)	X	X	X				
Jin et al. (2006)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan		X		X			
Kalczynski; Kamburowski (2006)	X			X		X			X		Clássico	Makespan esperado		X					
Liu, B. et al. (2006)	X		X	X		X		X			Sem espera	Makespan		X	X	X			
Grabowski; Pempera (2007)	X		X	X		X		X			Bloqueio; Permutacional	Makespan	X		X				
Jin et al. (2007)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan		X		X			

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Kalczynski; Kamburowski (2007b)	X			X		X		X		Sem espera; Sem tempo ocioso	Makespan		X					
Kalczynski; Kamburowski (2007a)	X		X	X		X		X		Permutacional	Makespan		X	X				
Wang; Cheng (2007)	X			X		X		X		Setup antecipado; Restrição de disponibilidade resumível; Permutacional	Makespan	X	X					
Wang; Edwin Cheng (2007)	X	X		X		X		X		Setup antecipado; Restrição de disponibilidade resumível; Permutacional	Makespan		X					
Chen; Pan; Lin (2008)	X		X	X		X		X		Recirculação	Makespan	X	X	X	X			
Chen; Pan; Wu (2008)	X		X	X		X		X		Recirculação; Permutacional	Makespan	X	X	X	X			
Fondreville et al. (2008)	X	X		X		X		X		Permutacional; Janelas de tempo mínimas; Janelas de tempo máximas	Soma ponderada dos tempos de conclusão de cada máquina	X						
Pan et al. (2008)	X		X	X		X		X		Sem espera	Makespan		X	X				
Paternina-Arboleda et al. (2008)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan		X					
Shiau et al. (2008)	X		X	X		X		X		Proporcional	Tempo ponderado total de conclusão		X	X	X			
Yang; Hsu; et al. (2008)	X			X		X		X		Restrição Separada de manutenção;	Makespan		X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Yang; Kuo; et al. (2008)	X			X		X		X			Recirculação; Setup independente da sequência; Famílias de Itens; Tempos de processamento idênticos por família	Makespan	X						
Al-Anzi; Allahverdi (2009)	X		X	X		X		X			Operações de montagem; Datas de entrega; Permutacional	Lateness máximo (BO e soma ponderada); Makespan (BO e soma ponderada)		X	X				
Chandra et al. (2009)	X		X	X		X		X			Permutacional; Datas de entrega comuns; Datas de entrega irrestritas; Datas de entrega sempre com atraso; Datas de entrega restritas	Atrasos e adiantamentos; Tempo médio de fluxo		X		X			
Choi; Lee (2009)	X		X	X		X		X			Tempos de processamento idênticos máquinas paralelas; Datas de entrega	Número de itens atrasados	X	X					
Choi; Kim (2009)	X		X	X		X		X			Recirculação; Permutacional	Atraso total	X	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Davoudpour; Ashrafi (2009)	X		X	X	X	X		X			Datas de entrega designáveis; Datas de entrega diferentes; Tempos de processamento controláveis; Operações ordenadas; Setup dependente da sequência	Minimização da função F (Soma ponderada do adiantamento, atraso, tempo de conclusão e penalidades de data de entrega)		X	X				
Figielska (2009)	X		X	X		X		X			Recursos adicionais renováveis; Requisição arbitrária de recursos	Makespan				X			
Ronconi; Henriques (2009)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Atraso total	X	X	X	X			
Czapiński (2010)	X		X	X		X		X			Permutacional	Tempo total de fluxo			X	X			
Easwaran et al. (2010)	X			X		X		X			Clássico	Makespan	X						
Gong et al. (2010)	X	X	X	X		X		X			Bloqueio; Setup compartilhado	Makespan; Makespan mais tempo total de bloqueio	X	X					
Lee et al. (2010)	X		X		X	X			X		Itens deterioráveis; Bloqueio	Makespan	X	X		X			
Liang et al. (2010)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Makespan		X	X	X			
Liao; Huang (2010)	X		X	X		X		X			Datas de entrega	Atraso total	X		X				
Mosheiov; Sarig (2010)	X	X	X	X		X		X			Máquina crítica; Datas de entrega comuns	Número ponderado de itens atrasados	X	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Naderi; Tavakkoli-Moghaddam; et al. (2010)	X		X	X		X		X		Tempos de transferência; Possibilidade de não passar por todos os estágios	Makespan (BO e independente); Atraso ponderado total (BO e independente)		X	X	X			
Ng et al. (2010)	X				X	X			X	Itens deterioráveis	Tempo total de conclusão	X	X					
Behnamian; Fatemi Ghomi (2011)	X		X	X		X		X		Setup dependente da sequência; Tempos processamento controláveis	Makespan (BO e Soluções não dominantes – SND de Pareto); Custo de alocação (BO e SND de Pareto)			X	X			
Behnamian; Zandieh (2011)	X		X	X		X		X		Setup dependente da sequência; Tempo espera limitado	Minimização da soma do adiantamento linear e do atraso quadrático			X	X			
Della Croce et al. (2014)	X		X	X		X		X		Permutacional	Tempo total de conclusão	X			X			X
Engin et al. (2011)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan			X	X			
Gao et al. (2011)	X		X	X		X		X		Sem espera	Tempo total de fluxo		X	X				
Gong; Tang (2011)	X		X	X		X		X		Transporte intermediário; Requisito de espaço físico para o item; Lotes	Makespan	X	X					
Lee et al. (2011)	X		X	X		X		X		Múltiplos agentes; Datas de entrega	Tempo total de conclusão (primeiro agente); Número de itens atrasados (segundo agente)		X	X	X			

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Li et al. (2011)	X		X		X	X		X			Tempos de processamento controláveis	Tempo total de conclusão	X	X	X				
Ng et al. (2011)	X	X	X		X	X			X		Sem espera; Sem tempo ocioso; Itens deterioráveis; Dominância da máquina	Makespan; Tempo total de conclusão		X					
Ribas et al. (2011)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Makespan		X	X	X			
Ahmadizar (2012)	X		X	X		X		X			Permutacional	Makespan		X	X				
Aydilek; Allahverdi (2012)	X		X	X		X		X			Sem espera	Makespan sujeito ao Tempo médio de conclusão		X	X	X			
Cheng et al. (2012)	X	X		X		X		X			Problemas de realocação; Restrições de recursos; Reciclagem de recursos; Permutacional; Não-Permutacional	Makespan	X				X		
Chiou et al. (2012)	X		X	X		X		X			Processamento em Flow Shop cruzado; Datas de entrega; Tempos de transporte	Lateness médio				X			
Deng; Gu (2012)	X		X	X		X		X			Sem tempo ocioso; Permutacional	Makespan		X		X			
El-Bouri (2012)	X		X	X			X			X	Datas de entrega itens; Datas de entrega das operações; Ultrapassagem de peças; Datas de liberação;	Atraso médio		X				X	

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Javadian et al. (2012)	X		X	X		X		X		Janelas de tempo; Setup antecipado dependente da sequência	Makespan	X		X			
Liao et al. (2012)	X		X	X		X		X		Clássico	Makespan	X		X	X		
Mehta et al. (2012)	X		X	X		X			X	Permutacional	Variância do tempo de conclusão		X				
Mosheiov; Oron (2012)	X				X	X		X		Proporcional; Tempo de processamento dependentes da posição; Datas de entrega comuns	Número de itens atrasados		X				
Shabtay; Gasper (2012)	X	X	X	X			X	X		Itens rejeitados; Clássico	Makespan mais Custo total de rejeição; Makespan sujeito ao Custo total de rejeição do menor limite superior R; Custo total de rejeição sujeito ao Makespan do menor limite superior K; Custo total de rejeição e Makespan (Pareto ótimo)	X	X				
Wang, C. et al. (2012)	X		X	X		X		X		Bloqueio; Permutacional	Makespan		X	X	X		

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Almeder; Hartl (2013)	X		X	X			X		X		Buffers limitados; Indisponibilidade da máquina	Utilização média esperada da máquina 1 (F1); Utilização média esperada do buffer (F2); Throughput esperado médio (F3); Combinação 50% de F1, 25% de F2 e 25% de F3		X	X			X	
Aydilek; Allahverdi (2013)	X		X	X	X	X				X	Tempos de processamento aleatórios; Tempos de processamento limitados; Setup separado do processamento	Makespan		X					
Bochtis et al. (2013)	X		X	X		X			X		Setup dependente da sequência; Permutacional	Makespan	X					X	
Božejko et al. (2013)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Chou (2013)	X		X	X		X	X	X			Tarefas em mais de uma máquina; Datas de liberação arbitrárias	Makespan		X	X	X			
Chung; Liao (2013)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan			X				
Dong et al. (2013)	X		X	X		X		X			Permutacional	Tempo total de fluxo			X	X			
Elalouf et al. (2013)	X	X		X		X		X			Just in Time; Datas de entrega	Número ponderado de itens (Just in time)		X					
Elyasi; Salmasi (2013)	X		X	X	X		X		X		Datas de liberação; Datas de entrega estocásticas	Número esperado de itens atrasados	X	X					

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Gao et al. (2013)	X		X	X		X		X			Sem espera	Tempo total de fluxo		X		X			
Gerstl; Mosheiov (2013)	X		X	X		X		X			Lotes; Setup dependente da máquina; Setup não antecipado; Itens idênticos	Makespan	X	X					
Chang et al. (2013)	X		X	X		X		X			Permutacional	Makespan		X	X	X			
Lin et al. (2013)	X		X	X		X		X			Tarefas de suporte; Itens regulares;	Tempo total de conclusão	X	X	X				
Lin; Ying (2013)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Makespan	X		X	X			
Liu et al. (2013)	X		X	X		X		X			Sem espera	Atraso total		X					
Moslehi; Khorasanian (2013)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Tempo total de conclusão	X	X		X			
Wang; Wang (2013)	X		X		X	X			X		Itens deterioráveis; Permutacional	Makespan	X	X					
Xu et al. (2013)	X	X	X	X		X		X			Processadores paralelos	Makespan			X				
Ziaee (2013)	X		X	X		X		X			Datas de entrega; Setup dependente da sequência	Atraso ponderado total		X		X			
Akhshabi et al. (2014)	X		X	X		X		X			Sem espera	Tempo total de fluxo			X	X			
Benavides et al. (2014)	X		X	X		X		X			Trabalhadores heterogêneos	Makespan	X			X			
Cheng et al. (2014)	X		X		X	X		X			Itens deterioráveis dependentes do tempo	Tempo total de conclusão sujeito ao Makespan	X	X					
Fernandez-Viagas; Framinan (2014)	X		X	X		X		X			Permutacional	Makespan		X		X			
Gerstl; Mosheiov (2014)	X	X		X		X		X			Tempos de processamento unitários; Lotes; Setup dependente da máquina	Makespan; Tempo total de fluxo	X						

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Jeong; Kim (2014)	X		X	X		X		X			Recirculação; Setup dependente da sequência	Atraso total	X	X					
Karimi; Davoudpour (2014)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan (BO); Atraso ponderado total (BO)				X			
Laha; Sapkal (2014)	X		X	X		X		X			Sem espera	Tempo total de fluxo		X					
Lee (2014)	X		X		X		X	X			Datas de liberação	Estimativa do tempo de fluxo do pedido		X				X	
Liu; Lu (2014)	X	X			X		X	X			Datas de liberação	Makespan		X					
Mao et al. (2014)	X		X	X		X		X			Agupamento de itens; Restrições de precedência; Sem tempo ocioso; Setup no último estágio; Tempos de transporte	Minimização da soma de atrasos e adiantamentos e tempo de espera do item		X					
Moslehi; Khorasanian (2014)	X		X	X		X		X			Permutacional; Buffers limitados	Makespan		X		X			
Naderi; Gohari; et al. (2014)	X	X	X	X		X		X			Possibilidade de não passar por todos os estágios	Makespan	X	X	X	X			
Naderi; Ruiz (2014)	X		X	X		X		X			Permutacional	Makespan		X	X	X			
Nagano et al. (2014)	X		X	X		X		X			Sem espera; Setup dependente da sequência; Datas de liberação	Makespan			X	X			
Pan; Ruiz (2014)	X		X	X		X		X			Sem tempo ocioso misto; Permutacional	Makespan		X	X	X			

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Shabtay et al. (2014)	X	X		X		X		X		Sem espera; Sem tempo ocioso; Tempos de processamento independentes da máquina; Tempos de processamento independentes do item; Tempos de transporte	Makespan (BO); Custo da seleção do robô (BO)	X						
Wang; Choi (2014)	X		X		X	X			X	Tempos de processamento estocásticos	Makespan			X	X			
Xu et al. (2014)	X		X	X		X		X		Recirculação; Permutacional	Makespan	X	X	X				
Chen et al. (2015)	X		X	X		X		X		Permutacional	Makespan		X	X	X			
Dasgupta; Das (2015)	X		X	X		X		X		Permutacional	Soma ponderada do Makespan e do tempo médio de fluxo		X	X	X			
Dong et al. (2015)	X		X	X		X		X		Permutacional	Tempo total de fluxo			X				
Fernandez-Viagas; Framinan (2015a)	X		X	X		X		X		Permutacional	Makespan sujeito ao atraso máximo		X	X	X			
Fernandez-Viagas; Framinan (2015b)	X		X	X		X			X	Permutacional; Datas de entrega	Atraso total		X					
Framinan; Perez-Gonzalez (2015)	X		X	X		X		X		Permutacional	Makespan esperado		X		X			
Lei (2015a)	X		X	X		X		X		Grupos diferentes de itens conforme agentes	Makespan (primeiro agente simples objetivo (SO)); Atraso total (segundo agente e SO)			X	X			

QUADRO 20 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *FLOW SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (conclusão)

Lei (2015b)	X		X	X		X		X			Grupos diferentes de itens conforme agentes	Makespan (primeiro agente e SO); Atraso total (segundo agente e SO)				X			
Lin et al. (2015)	X		X	X		X		X			Permutacional	Makespan		X	X	X			
Liou; Hsieh (2015)	X		X	X		X		X			Programação de grupo; Setup dependente da sequência; Transporte dependente da sequência; Permutacional	Makespan			X	X			
Ribas; Companys (2015)	X		X	X		X		X			Bloqueio	Tempo total de fluxo		X	X	X			
Samarghandi (2015)	X		X	X		X		X			Sem espera; Datass de entrega	Makespan	X	X	X	X			
Yang (2015)	X	X	X	X		X		X			Máquinas dedicadas no primeiro estágio	Tempo total de conclusão	X	X					

FONTE: O Autor (2017).

6 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM *JOB SHOP*

Nas próximas seções realiza-se a RSL deste ambiente fabril. Examinou-se 240 artigos nesta análise, no período compreendido entre 1960 e 2015. O Quadro 3 apresenta os artigos, em termos dos autores, periódico e ano de publicação.

QUADRO 3 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *JOB SHOP* (continua)

Autor	Periódico
Thompson (1960)	Naval Research Logistics
Wilbrecht; Prescott (1969)	Management Science
Bozoki; Richard (1970)	I I E Transactions
Panwalkar (1973)	Management Science
Holloway; Nelson (1974a)	Management Science
Holloway; Nelson (1974b)	Management Science
Holloway; Nelson (1975)	I I E Transactions
Lageweg et al. (1977)	Management Science
Nelson et al. (1977)	I I E Transactions
Sculli (1980)	Omega
Pinedo (1981)	Naval Research Logistics
Deckro et al. (1982)	Computers & Operations Research
Kanet; Hayya (1982)	Journal of Operations Management
Baker; Kanet (1983)	Journal of Operations Management
Elvers, Douglas A.; Taube (1983)	European Journal of Operational Research
Elvers, Douglas A; Taube (1983)	Omega
Smith; Seidmann (1983)	Computers & Industrial Engineering
Baker (1984)	Management Science
Buzacott; Shanthikumar (1985)	Management Science
Treleven; Elvers (1985)	Journal of Operations Management
Vepsalainen; Morton (1987)	Management Science
Grabowski; Janiak (1987)	European Journal of Operational Research
Adams et al. (1988)	Management Science
Kanet (1988)	Journal of Operations Management
Carlier; Pinson (1989)	Management Science
Kubiak (1989)	European Journal of Operational Research
Park; Bobrowski (1989)	Journal of Operations Management
Philipoom et al. (1989)	Journal of Operations Management
Brucker; Schlie (1990)	Computing
Scudder et al. (1990)	Journal of Operations Management
Applegate; Cook (1991)	ORSA Journal on Computing
Wein; Ou (1991)	Management Science
Gravel et al. (1992)	European Journal of Operational Research

QUADRO 3 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *JOB SHOP* (continuação)

Laarhoven et al. (1992)	Operations Research
Wein; Chevalier (1992)	Management Science
Adam et al. (1993)	European Journal of Operational Research
Amico; Trubian (1993)	Annals of Operations Research
Brandimarte (1993)	Annals of Operations Research
Kanet; Zhou (1993)	Production and Operations Management
Melnyk et al. (1994)	Production and Operations Management
Abdallah (1995)	International Journal of Operations & Productions Management
Barnes; Chambers (1995)	I I E Transactions
Della Croce et al. (1995)	Computers & Operations Research
Dorndorf; Pesch (1995)	Computers & Operations Research
Golenko-Ginzburg et al. (1995)	International Journal of Production Economics
Herrmann et al. (1995)	Production and Operations Management
Jensen et al. (1995)	Journal of Operations Management
Kim; Bobrowskj (1995)	Production and Operations Management
Low (1995)	Computers & Industrial Engineering
Lourenço (1995)	European Journal of Operational Research
Sadeh et al. (1995)	Artificial Intelligence
He et al. (1996)	European Journal of Operational Research
Kubiak et al. (1996)	Operations Research
Kubiak; Timkovsky (1996)	European Journal of Operational Research
Kuroda; Wang (1996)	International Journal of Production Economics
Nowicki; Smutnicki, Czeslaw (1996)	Management Science
Sadeh; Fox (1996)	Artificial Intelligence
Choi; Korkmaz (1997)	Annals of Operations Research
Dauzère-Pérès; Paulli (1997)	Annals of Operations Research
Fang; Xi (1997)	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Lee; Dagli (1997)	International Journal of Production Economics
Lee; Posner (1997)	Operations Research
Balas; Vazacopoulos (1998)	Management Science
Cheng; Jiang (1998)	Computers & Industrial Engineering
Luh et al. (1998)	Annals of Operations Research
Kravchenko (1998)	European Journal of Operational Research
Wu et al. (1999)	Operations Research
Holthaus (1999)	Computers & Industrial Engineering
Neumann; Schneider (1999)	Annals of Operations Research
Pinedo; Singer (1999)	Naval Research Logistics
Sabuncuoglu; Bayiz (1999)	European Journal of Operational Research
Litchfield; Narasimhan (2000)	Production and Operations Management
Pezzella; Merelli (2000)	European Journal of Operational Research
Boudoukh et al. (2001)	Journal of Scheduling
Cheung; Zhou (2001)	Annals of Operations Research

QUADRO 3 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *JOB SHOP* (continuação)

Wang; Zheng (2001)	Computers & Operations Research
Yang; Wang (2001)	Computers & Operations Research
Zhou et al. (2001)	Computers & Industrial Engineering
Asano; Ohta (2002)	Computers & Industrial Engineering
Dai; Weiss (2002)	Operations Research
Esquivel et al. (2002)	Knowledge-based Systems
Golenko-Ginzburg; Gonik (2002)	International Journal of Production Economics
Mascis; Pacciarelli (2002)	European Journal of Operational Research
Sabuncuoglu; Comlekci (2002)	Omega
Steinhöfel et al. (2002)	Computers & Operations Research
Tarantilis; Kiranoudis (2002)	International Journal of Production Economics
Yoshitomi (2002)	International Transactions in Operational Research
Bertsimas et al. (2003)	Operations Research
Chen; Luh (2003)	European Journal of Operational Research
Kis (2003)	European Journal of Operational Research
Lengyel et al. (2003)	Computers & Industrial Engineering
Schuster; Framinan (2003)	Operations Research Letters
Yoshitomi; Yamaguchi (2003)	International Transactions in Operational Research
Mattfeld; Bierwirth (2004)	European Journal of Operational Research
Meloni et al. (2004)	Annals of Operations Research
Murovec; Šuhel (2004)	European Journal of Operational Research
Sung Lee et al. (2004)	Computers & Operations Research
Wenqi; Aihua (2004)	Computers & Operations Research
Woeginger (2004)	Operations Research Letters
Alvarez-Valdes et al. (2005)	European Journal of Operational Research
Cavory et al. (2005)	European Journal of Operational Research
De Bontridder (2005)	Journal of Scheduling
Gonçalves et al. (2005)	European Journal of Operational Research
Hurink; Knust (2005)	European Journal of Operational Research
Jansen et al. (2005)	European Journal of Operational Research
Low et al. (2005)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Nowicki; Smutnicki (2005)	Journal of Scheduling
Pan; Chen (2005)	Computers & Operations Research
Tavakkoli-Moghaddam; Daneshmand-Mehr (2005)	Computers & Industrial Engineering
Tavakkoli-Moghaddam et al. (2005)	Applied Mathematics and Computation
Zhou et al. (2005)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Zoghby et al. (2005)	European Journal of Operational Research
Al-Anzi et al. (2006)	Applied Mathematics and Computation
Framinan; Schuster (2006)	Computers & Operations Research
Lian et al. (2006)	Applied Mathematics and Computation
Liu, T.-K. et al. (2006)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology

QUADRO 3 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *JOB SHOP* (continuação)

Ohta; Nakatani (2006)	International Journal of Production Economics
Pathumnakul; Egbelu (2006)	International Journal of Production Economics
Ren; Weng (2006)	I I E Transactions
Sha; Hsu (2006)	Computers & Industrial Engineering
Blazewicz et al. (2007)	Journal of Scheduling
Brucker; Kampmeyer (2007)	Annals of Operations Research
El-Bouri et al. (2007)	European Journal of Operational Research
Gao et al. (2007)	Computers & Industrial Engineering
Gröflin; Klinkert (2007)	European Journal of Operational Research
Heinonen; Pettersson (2007)	Applied Mathematics and Computation
Ho et al. (2007)	European Journal of Operational Research
Jia et al. (2007)	Computers & Industrial Engineering
Petrovic et al. (2007)	Decision Support Systems
Tsai et al. (2007)	Applied Mathematics and Computation
Zhang et al. (2007)	Computers & Operations Research
Artigues; Feillet (2008)	Annals of Operations Research
Caumond et al. (2008)	Computers & Operations Research
Essafi et al. (2008)	Computers & Operations Research
Gao et al. (2008)	Computers & Operations Research
Huang; Liao (2008)	Computers & Operations Research
Huang; Yang (2008)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Liaw (2008)	Computers & Operations Research
Pezzella et al. (2008)	Computers & Operations Research
Niu et al. (2008)	Applied Mathematics and Computation
Vilcot; Billaut (2008)	European Journal of Operational Research
Vinod; Sridharan (2008)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Zhang, C. Y. et al. (2008)	Computers & Operations Research
Zhang, C. et al. (2008)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Abdelmaguid (2009)	Applied Mathematical Modelling
Bożejko; Makuchowski (2009)	Computers & Industrial Engineering
Fattahi et al. (2009)	Applied Mathematical Modelling
Liu; Kozan (2009)	Computers & Operations Research
Luh; Chueh (2009)	Information Sciences
Manikas; Chang (2009)	Computers & Industrial Engineering
Penn; Raviv (2009)	European Journal of Operational Research
Topaloglu; Kilincli (2009)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Wang et al. (2009)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Wong et al. (2009)	Computers & Industrial Engineering
Xing et al. (2009)	Applied Soft Computing
Zhang et al. (2009)	Computers & Industrial Engineering
Zhou et al. (2009)	European Journal of Operational Research
Adibi et al. (2010)	Expert Systems with Applications
De Giovanni; Pezzella (2010)	European Journal of Operational Research

QUADRO 3 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *JOB SHOP* (continuação)

Gu et al. (2010)	Computers & Operations Research
Huang (2010)	International Journal of Production Economics
Li et al. (2010)	Computers & Industrial Engineering
Nazarathy; Weiss (2010)	Journal of Scheduling
Özgüven et al. (2010)	Applied Mathematical Modelling
Pardalos et al. (2010)	Computational Optimization & Applications
Parthanadee; Buddhakulsomsiri (2010)	Computers and Electronics in Agriculture
Sha; Lin (2010)	Expert Systems with Applications
Xing et al. (2010)	Applied Soft Computing
Yazdani et al. (2010)	Expert Systems with Applications
Zandieh; Adibi (2010)	International Journal of Production Research
Agnētis et al. (2011)	Journal of Scheduling
Al-Hinai; ElMekkawy (2011)	International Journal of Production Economics
Chan et al. (2011)	Expert Systems with Applications
Cheng, H.-C. et al. (2011)	Expert Systems with Applications
Gutiérrez; García-Magariño (2011)	Knowledge-based Systems
Kammer et al. (2011)	Computers & Operations Research
Liu et al. (2011)	Expert Systems with Applications
Mati et al. (2011)	European Journal of Operational Research
Moslehi; Mahnam (2011)	International Journal of Production Economics
Sels et al. (2011)	European Journal of Operational Research
Vinod; Sridharan (2011)	International Journal of Production Economics
Xing et al. (2011)	Computational Optimization & Applications
Yusof et al. (2011)	Applied Soft Computing
Chen et al. (2012)	Expert Systems with Applications
Georgiadis; Michaloudis (2012)	European Journal of Operational Research
Goren et al. (2012)	Naval Research Logistics
Gromicho et al. (2012)	Computers & Operations Research
Horng et al. (2012)	Expert Systems with Applications
Horng; Lin (2012)	Applied Mathematics and Computation
Karimi et al. (2012)	Knowledge-based Systems
Lei (2012)	Applied Mathematics and Computation
Li et al. (2012)	Applied Mathematics and Computation
Özgüven et al. (2012)	Applied Mathematical Modelling
Shen; Buscher (2012)	European Journal of Operational Research
Wang, L. et al. (2012)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Zhang, Q. et al. (2012)	Computers & Operations Research
Zhang, R. et al. (2012)	Knowledge-based Systems
Zhang; Wu (2012)	Information Sciences
Bülbül; Kaminsky (2013)	Journal of Scheduling
Chen; Matis (2013)	International Journal of Production Economics
Cheng et al. (2013)	Annals of Operations Research
Chiang; Lin (2013)	International Journal of Production Economics
Ebadi; Moslehi (2013)	Computers & Operations Research

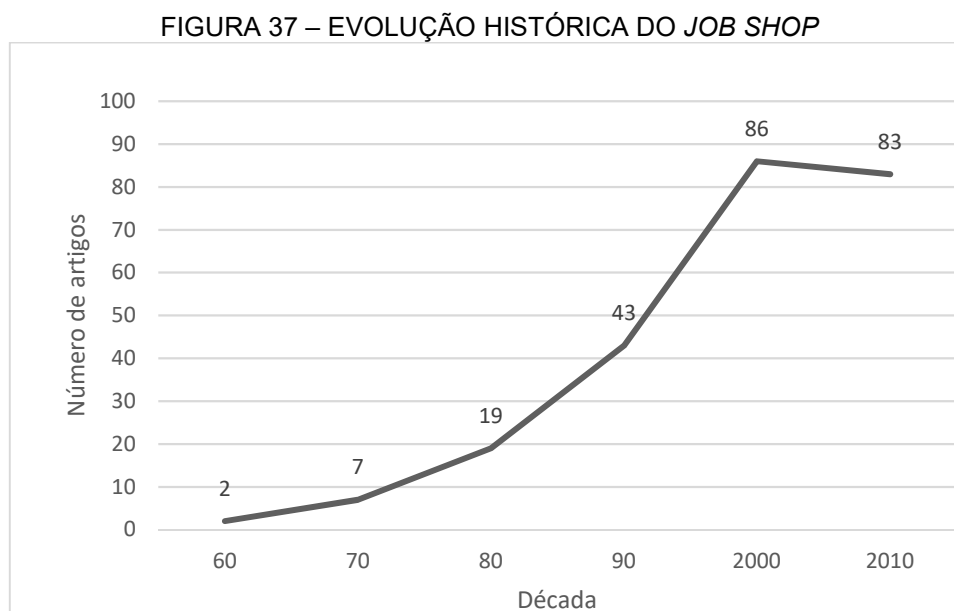
QUADRO 3 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *JOB SHOP* (conclusão)

Huang et al. (2013)	International Journal of Production Economics
Li; Pan (2013)	International Journal of Production Economics
Lobo et al. (2013)	Computers & Operations Research
Mencía et al. (2013)	Annals of Operations Research
Nie et al. (2013)	Computers & Industrial Engineering
Qing-dao-er-ji et al. (2013)	Applied Soft Computing
Qiu; Lau (2013)	Applied Soft Computing
Rojas-Santiago et al. (2013)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Wang et al. (2013)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Xiong et al. (2013)	International Journal of Production Economics
Yuan; Xu (2013a)	Computers & Operations Research
Yuan; Xu (2013b)	Computers & Industrial Engineering
Yuan et al. (2013)	Applied Soft Computing
Zhang et al. (2013)	International Journal of Production Economics
Guyon et al. (2014)	Annals of Operations Research
Jia; Hu (2014)	Computers & Operations Research
Li et al. (2014)	Applied Mathematical Modelling
Rossi (2014)	International Journal of Production Economics
Spanos et al. (2014)	International Transactions in Operational Research
Zeng et al. (2014)	Applied Soft Computing
Zhao et al. (2014)	Computers & Operations Research
Abdeljaouad et al. (2015)	European Journal of Operational Research
Abdelmaguid (2015)	Applied Mathematics and Computation
Birgin et al. (2015)	European Journal of Operational Research
Cruz-Chávez et al. (2015)	International Transactions in Operational Research
Gao et al. (2015)	Computers & Industrial Engineering
González et al. (2015)	Computers & Operations Research
Kaplanoğlu (2015)	Expert Systems with Applications
Lei; Guo (2015)	International Journal of Production Economics
Lin (2015)	Knowledge-based Systems
Mokhtari; Dadgar (2015)	Computers & Operations Research
Murovec (2015)	European Journal of Operational Research
Palacios; González; et al. (2015)	Computers & Operations Research
Peng et al. (2015)	Computers & Operations Research
Shen; Yao (2015)	Information Sciences
Zhang et al. (2015)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Zhao et al. (2015)	Expert Systems with Applications

FONTE: O Autor (2016).

6.1 ANO

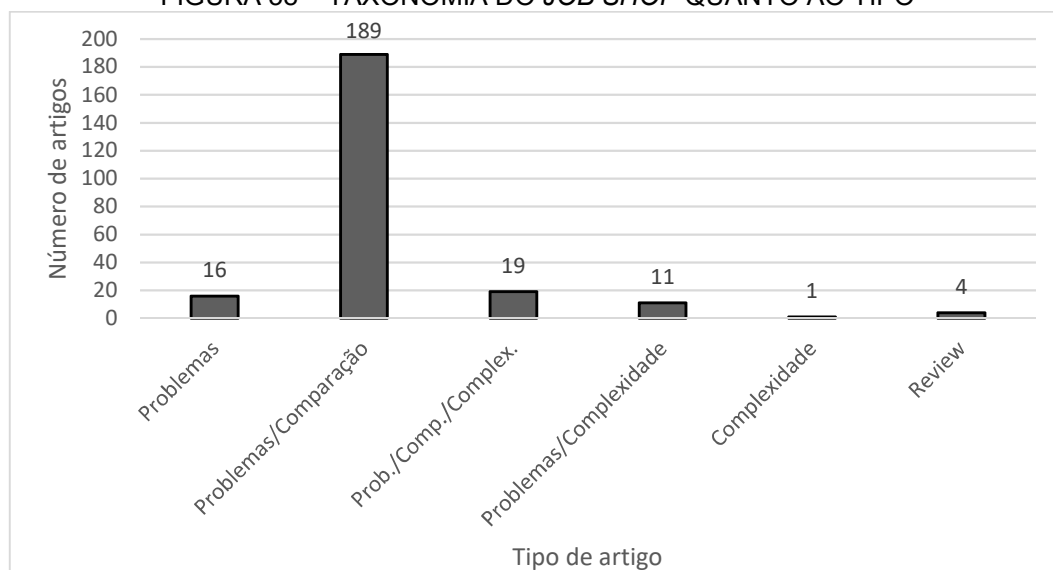
Em relação a essa métrica, a temática vivenciou um sensível crescimento entre as décadas de 60, quando havia apenas dois artigos, para os quarenta e três verificados na década de 90. Mas o maior salto se deu entre a década de 90 e a de 2000, quando a quantidade dos artigos pertencentes ao escopo da revisão duplicou. Entre a década de 2000 e a década de 2010 houve uma ligeira queda, mas considerando-se que esta última não se encerrou, a expectativa é que o número de publicações ao final de 2019 seja consideravelmente maior do que o verificado na década passada. A Figura 37 apresenta a evolução histórica do *Job Shop* ao longo das décadas estudadas.



FONTE: O Autor (2016).

6.2 TIPO

No que concerne a essa métrica, são seis as categorias em que os artigos foram classificados. A Figura 38 traz esse panorama.

FIGURA 38 – TAXONOMIA DO *JOB SHOP* QUANTO AO TIPO

FONTE: O Autor (2016).

Os artigos tipificados em Problemas/Comparação são aqueles mais frequentes, com 189 dos 240 artigos (78,75%) aqui classificados. Destes, destaca-se o estudo de Wilbrecht e Prescott (1969), que dedicou-se a análise da influência dos tempos de preparação no desempenho de um *Job Shop* com nove máquinas. Para isso os autores usaram heurísticas da literatura, comparando seus resultados e inferiram que, quando o ambiente fabril está repleto de itens, priorizar o item com menor tempo de *setup*, independentemente do tempo de processamento deste oferece os melhores resultados, sob o prisma do desempenho geral da linha.

No outro lado do espectro está o artigo que se dedica exclusivamente às ponderações acerca da complexidade algorítmica e computacional do modelo estudado. Este artigo, de Pinedo (1981) trabalha este conteúdo a partir do exame de problemas com tempos de processamento exponencialmente distribuídos, em um cenário com duas máquinas. O autor se dedica a provas matemáticas destinadas à sustentação do teorema enunciado por ele, que versa sobre a política ótima de minimização do *makespan* esperado.

Com número de publicações muito próximos, estão os artigos que se dedicam ao tipo Problemas, com 16 trabalhos; aqueles estudos, que além de aplicados, fazem análises comparativas e ponderam sobre a complexidade algorítmica do problema em questão, aqui tipificados em Problemas/Comparação/Complexidade, com 19; e aqueles dedicados a tratar do estudo aplicado do *Job Shop*, além de versar sobre a complexidade, classificados como Problemas/Complexidade, com 11.

Em relação ao primeiro, destaca-se o artigo de Deckro et al. (1982) que utilizou *Goal Programming* na resolução de um *Job Shop* multicritério, visando à minimização do *throughput*, do *makespan*, do *lateness* e do atraso totais. Os autores aplicaram a heurística em um modelo com três itens e quatro máquinas.

Em relação ao segundo, se pode citar o artigo de Carlier e Pinson (1989). Neste artigo, utilizou-se o *Branch and Bound* na resolução das instâncias, que foram ora aleatoriamente geradas, ora advindas da literatura, como as instâncias de Muth e Thompson (1963), cujo famosa instância de 10 itens e 10 máquinas ficou sem resolução e a prova da otimalidade da resposta até esse trabalho. No tocante à complexidade, os autores trataram de avaliar a complexidade computacional de cada passo do algoritmo utilizado por eles, além de tratar de proposições e provas matemáticas que conduziram o estudo.

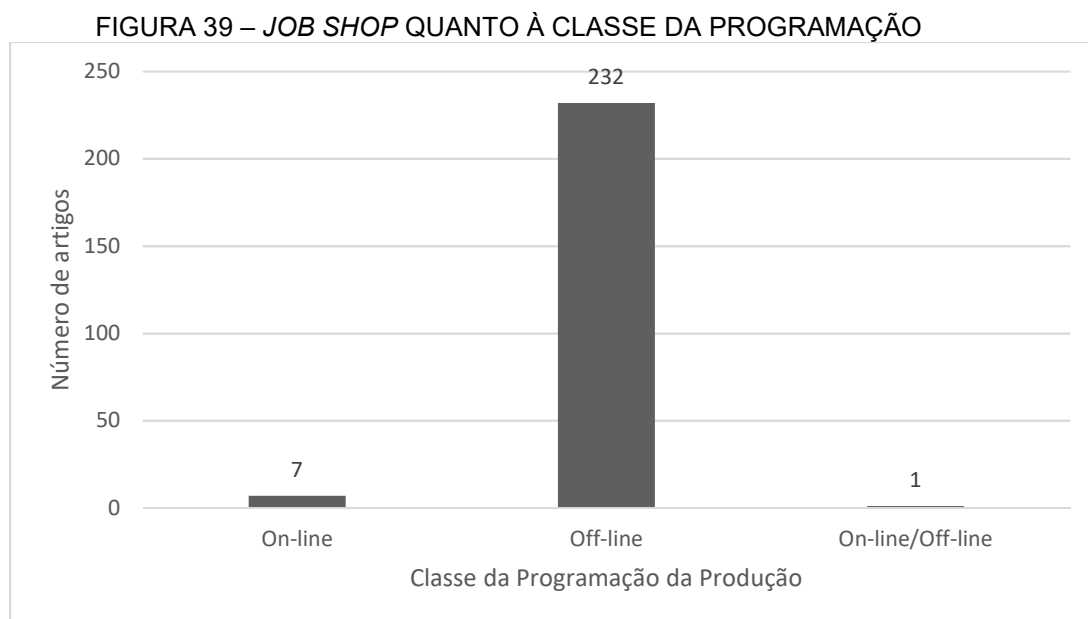
Em relação ao último, tem-se o estudo de Jansen et al. (2005), que elabora Esquemas de Aproximação de Tempo Polinomial (PTAS – *Polynomial-Time Approximation Schemes*), que é um tipo de aproximação utilizada frequentemente em problemas de otimização do tipo NP-difícil. Os autores tratam desses algoritmos para resolver um problema preemptivo e com tempos de processamento controláveis.

Em uma posição de menor destaque dentre os estudos contidos na presente revisão estão os artigos de *review*, com apenas quatro ocorrências. Dentre estas, o artigo de Smith e Seidmann (1983) faz uma revisão acerca de regras de prioridade e outras heurísticas propostas por outros autores no que tange a procedimentos de seleção da data de entrega. Propondo uma taxonomia para esse o problema de designação da data de entrega.

Em suma, assim como constatado no capítulo anterior, quando do exame desta mesma métrica, estudos que se detem a apenas um aspecto ou tipo são encontrados em menor número, se comparado àqueles que se dedicam à análise de mais de uma classificação. Em pesquisas futuras, se pode avaliar a possibilidade de publicação de artigos que se dedicam a estudos diversos daqueles categorizados em Problemas/Comparação, como aqueles tipificados em Problemas/Complexidade, por exemplo.

6.3 CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Os artigos são aqui categorizados em *on-line*, *off-line* e *on-line/off-line*, quando há um estudo comparativo entre ambas as classes. A Figura 39 traz o gráfico que contém o número de publicações por categoria.



FONTE: O Autor (2016).

Da análise da figura, é notória a prevalência dos modelos *off-line*, posto que esses modelos são mais simples, pois todas as informações necessárias ao sequenciamento são conhecidas *à priori*. Dentre estes trabalhos, se pode citar aquele desenvolvido por Bozejko e Makuchowski (2009), que resolveu um problema de *Job Shop* sem espera, visando à minimização do *makespan*, valendo-se de um método resolutivo híbrido.

Dentre a ínfima quantidade de artigos *on-line* contidos na presente revisão, há que se destacar o trabalho de Holthaus (1999). Neste, as informações correlatas ao tempo de chegada, data de entrega, roteirização e tempos de processamento de um item não são conhecidos até que o item chegue ao chão de fábrica. O estudo também considera a possibilidade de períodos de indisponibilidade da máquina. Outro ponto relevante a se destacar repousa na utilização de diversas heurísticas advindas da literatura, que o autor utiliza na resolução de diversos critérios de otimalidade, estratificados em dois grupos: os objetivos baseados em tempos de fluxo, relacionados à redução dos tempos de manufatura necessários à conclusão dos itens;

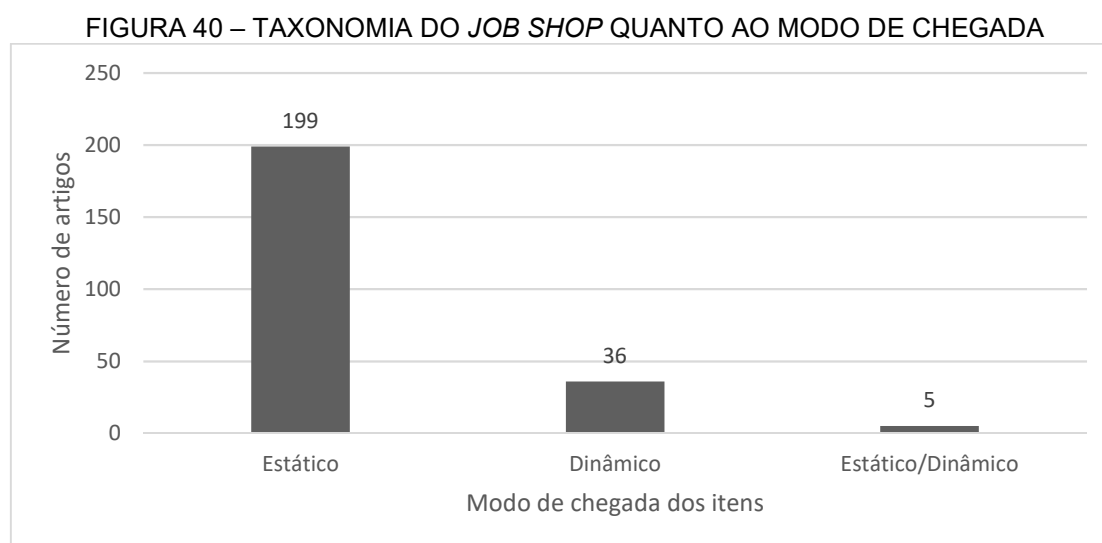
e objetivos baseados nas datas de entrega, que visam à conclusão dos itens na data prometida ao cliente.

No que tange a parca quantidade de artigos tipificados em *on-line/off-line* (1 de 240), tem-se o estudo de Shen e Yao (2015), que faz um estudo detalhado, em que se relaciona o desconhecimento à priori acerca da data de entrega e do tempo de processamento, com estratégias de programação preditiva-reativa, característica de ambientes dinâmicos. Nessa estratégia, há pontos de ressequenciamento onde programações prévias são revistas de modo a se adaptar às mudanças da linha. Além disso, os autores exploram também, sob outra perspectiva, o binômio ambiente estático e *off-line*, comparando as características das duas metodologias.

Em suma, há campo considerável de exploração para pesquisas futuras no que concerne à classe *on-line* da Programação da Produção, bem como estudos comparativos entre as duas classes também têm uma possibilidade de prospecção bem razoável.

6.4 MODO DE CHEGADA DOS ITENS

Os artigos são classificados à luz dessa métrica em estático, dinâmico ou estático/dinâmico. A Figura 40 traz o gráfico que relaciona a quantidade de publicações com o modo de chegada.



FONTE: O Autor (2016).

No que concerne a essa métrica, constata-se a predominância do *Job Shop* estático, em que não há chegadas e, ou, desistências ao longo do processo produtivo. Destes, se pode citar o artigo de Kubiak e Timkovsky (1996), que em um modelo com duas máquinas e com tempos unitários de execução das operações, utilizou um método exato e autoral de resolução, visando à minimização do tempo de conclusão total.

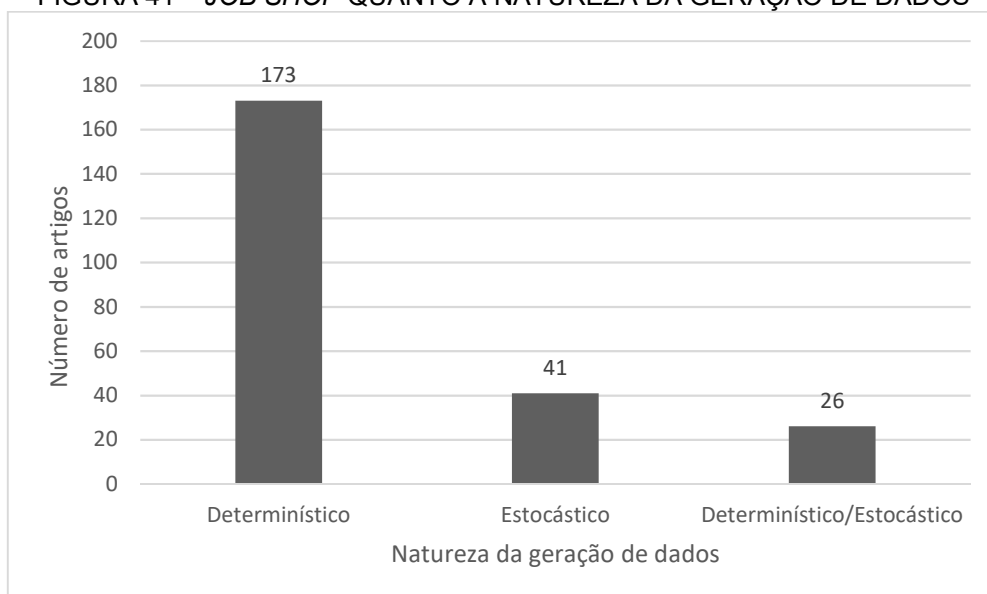
No tangente a trabalhos que trataram do modo dinâmico de chegada dos itens, destaca-se o artigo de Nelson et al. (1977), em que se trata de chegadas dinâmicas (intermitentes), o que é mais próximo do que se encontra de fato nos ambientes fabris do mundo real. Nesse estudo, dedicado à minimização do atraso total, os autores propõem duas estratégias heurísticas para tratar desse problema. A primeira delas não permite atraso e que os itens que já estavam na linha no tempo 0 tem prioridade sobre as novas chegadas. A segunda permite o atraso dos itens e, a partir da regra de prioridade menor folga (*slack*) faz-se um balanceamento entre as novas chegadas e os itens que já estavam no tempo 0.

Dentre os trabalhos que compõem o menor estrato da análise, que são aqueles tipificados em estático/dinâmico, tem-se o artigo de Treleven e Elvers (1985) trata de regras de designação dos operadores tanto estáticas como dinâmicas. O modelo trabalhado pelos autores é conhecido na literatura como modelos de duplo conjunto de restrições (*dual-constrained*), definido como aquele em que a capacidade da linha pode ser restringida pela capacidade da máquina, do operador ou de ambos.

Em suma, há campo a se trabalhar no que tange a *Job Shops* dinâmicos e no estudo comparativo de ambos os modos de chegada. Há que se considerar que tais modelos são complexos, o que é uma possível explicação da infrequência destes.

6.5 NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS

No que diz respeito a essa métrica, os artigos são classificados em Determinístico, Estocástico e Determinístico/Estocástico. A Figura 41 traz o gráfico em que se relaciona o número de artigos com o tipo de dados encontrado nos artigos.

FIGURA 41 – *JOB SHOP* QUANTO À NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS

FONTE: O Autor (2016).

A maioria dos artigos, como pode ser observado na figura trata de problemas determinísticos. Dentre estes, se pode citar o artigo de Panwalkar (1973), que resolve um problema pequeno, com apenas duas máquinas e que faz considerações acerca de janelas de tempo conhecidas e cujos itens não podem exceder os limites impostos a elas.

Dentre os artigos que tratam do *Job Shop* estocástico, o estudo de Adam et al. (1993), em que o tempo de processamento dos itens é uma variável aleatória exponencialmente distribuída. Os autores trabalham com heurísticas em versões estáticas e dinâmicas, a fim de minimizar o *lead time*, o *lateness*, o atraso condicional e a porcentagem de itens atrasados.

Dentre os artigos classificados em Determinístico/Estocástico, há que se destacar o artigo de Elvers e Taube (1983). Nesse artigo, os autores não utilizam um conjunto híbrido de dados, mas procuram responder em seu estudo se o pressuposto de que os tempos de processamento utilizados são determinísticos ou estocásticos impacta na escolha de qual regra de prioridade usar. Ao final do estudo, os autores concluem que o impacto não causa diferença significativa nos resultados apresentados em relação à escolha da regra de prioridade. O autor faz a ressalva de que a imprecisão quanto ao tempo de processamento de um item pode ter efeitos consideráveis nas áreas de custo e estimação da carga de trabalho.

Em síntese, os modelos estocásticos de Programação da Produção em *Job Shop* são um campo profícuo a ser tratado em trabalhos futuros nessa área. Nota-se também que após décadas de estudo nessa temática, ainda há um *gap* considerável entre o mundo real e o mundo acadêmico, posto que no primeiro os dados são em sua grande maioria estocásticos.

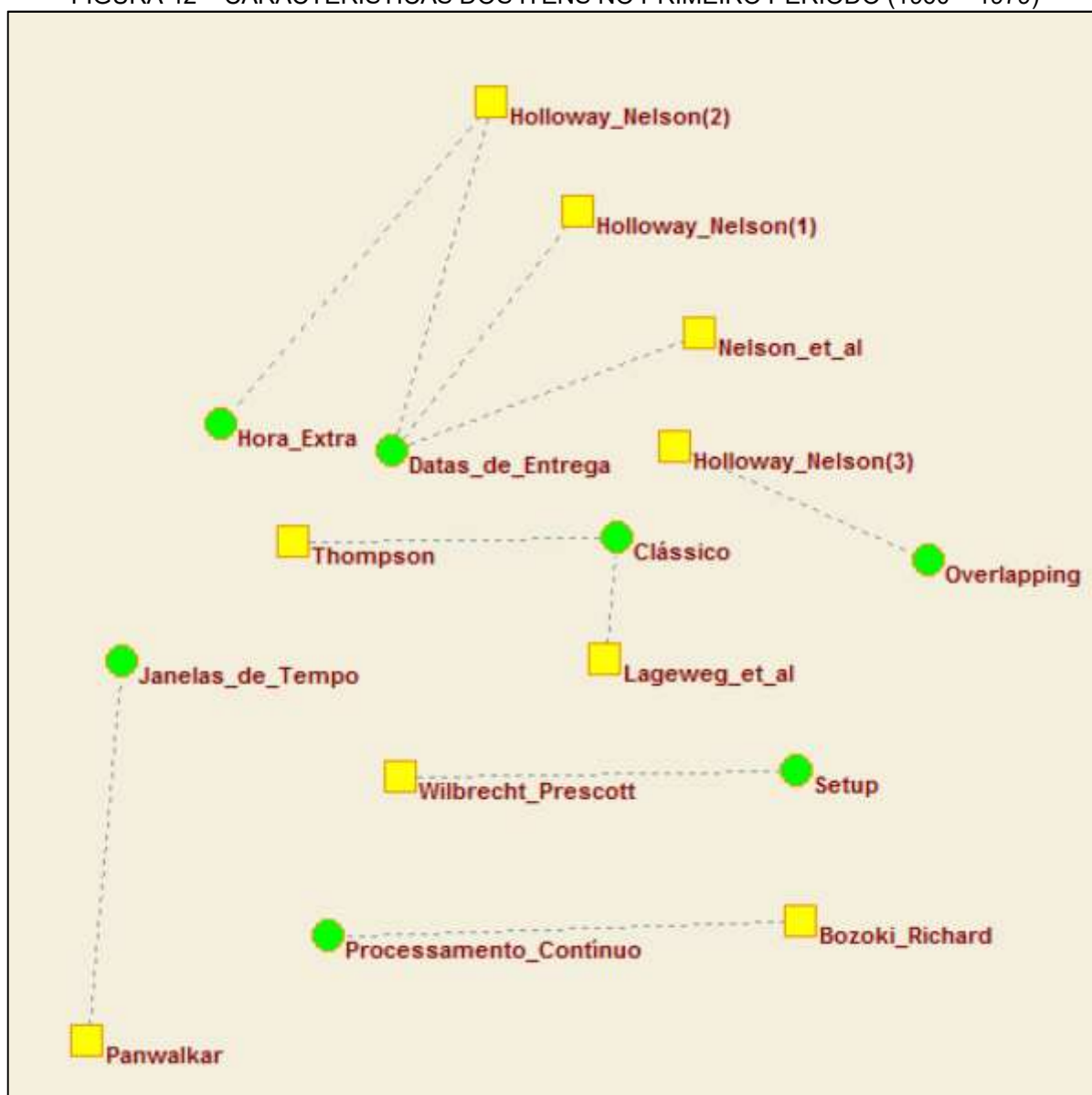
6.6 CARACTERÍSTICAS DOS ITENS

Assim como no capítulo predecessor, a partir dessa métrica são construídas redes no software Pajek. Em relação ao *Job Shop*, o período analisado foi dividido em cinco estratos temporais: o período compreendido entre 1960 e 1979 compõe o Primeiro Período; o período entre 1980 e 1989, o Segundo Período, o período entre 1990 e 1999, o Terceiro Período; o período entre 2000 e 2009, o Quarto Período; e o período entre 2010 e 2015, o Quinto Período.

6.6.1 Primeiro Período (1960 – 1979)

Nesse período há apenas nove artigos pertencentes ao escopo analisado e nestes, há apenas sete características abordadas. Destas, destaca-se a preocupação dos autores com modelos que ponderem acerca das datas de entrega, que foi tratada em três artigos. A Figura 42 retrata esse período.

FIGURA 42 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

Em Holloway e Nelson (1974a), os autores tratam das datas de entrega no que concerne aos critérios e regras heurísticas correlatas a elas, como a regra MTP, EDD e Menor Folga. Nesse trabalho, utiliza-se modelo estocástico, onde os tempos de processamento são variáveis aleatórias. Além de regras clássicas da literatura, os autores também propõem um procedimento que procura eliminar todas as violações de precedência, garantindo desse modo uma programação factível e que satisfaça todas as datas de entrega.

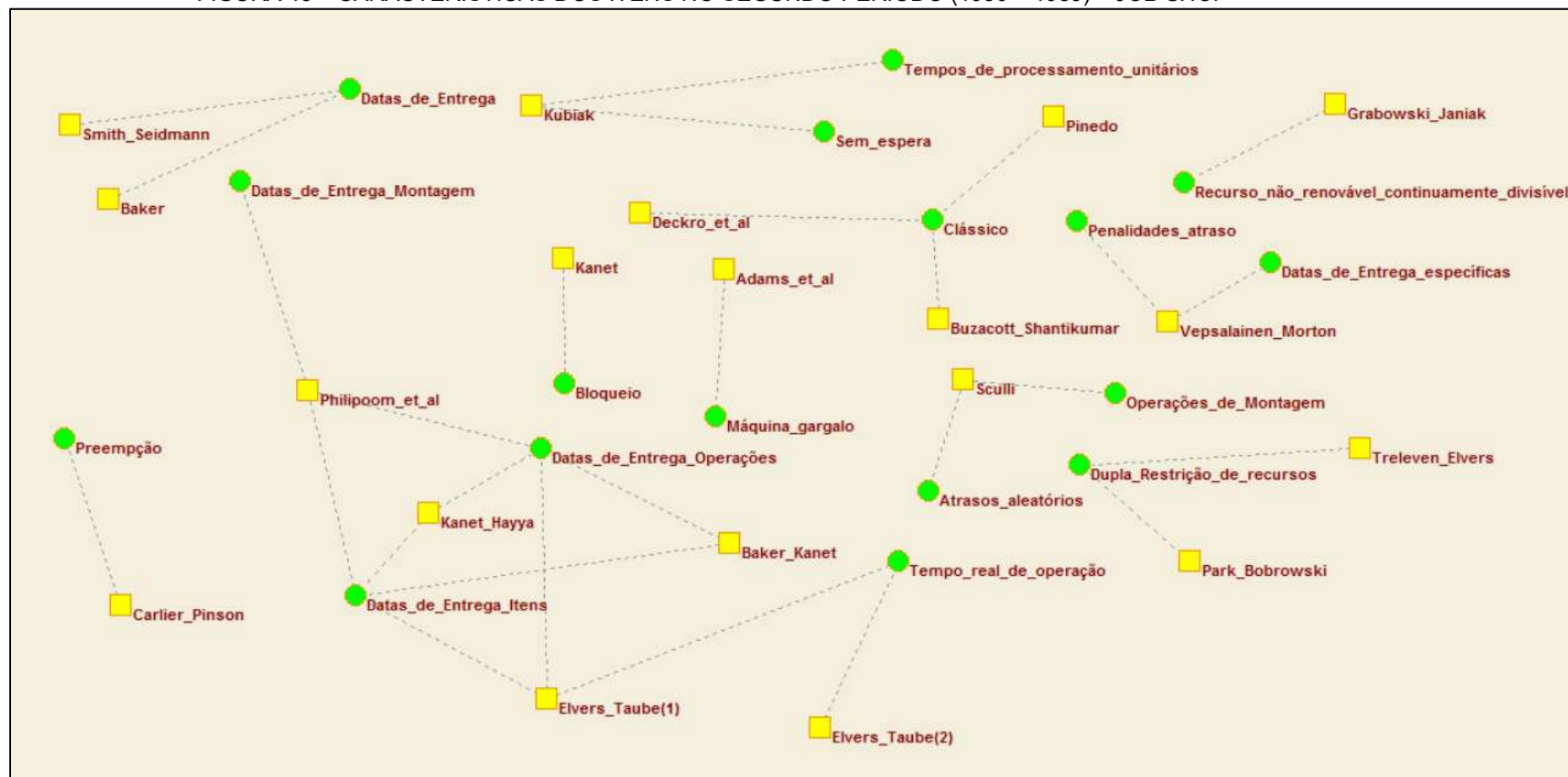
Em Holloway e Nelson (1974b), identificado na rede com Holloway e Nelson (2), o autor considera não apenas as datas de entrega, mas a possibilidade de ocorrer

horas extras, que devem ser minimizadas, considerando-se que as datas de entrega sejam satisfeitas. Os autores propõem um método resolutivo heurístico que seja aplicável tanto a ambientes estáticos como a ambientes dinâmicos. Nesse trabalho, também se aborda a questão referente ao *trade-off* existente entre a possibilidade de atrasos e o uso de horas extras, sob o prisma econômico.

Em Nelson et al. (1977) trabalha com as datas de entrega em um modelo dinâmico e estocástico, o que torna o estudo mais próximo da realidade encontrada nas indústrias. Os autores utilizaram o procedimento desenvolvido em Holloway e Nelson (1974a), voltado ao ambiente estático, valendo-se da solução de problemas desse tipo e aplicando-as em problemas dinâmicos. Isso traz duas opções ao tomador de decisão: a primeira é atualizar a lista de itens a cada nova chegada, o que, na prática, pode ser considerado um novo problema estático; a outra estratégia é usar períodos específicos de revisão, que podem ser de tamanho fixo ou variável, do sequenciamento. A primeira estratégia é indicada quando a chegada de novos itens à linha é pouco frequente, enquanto a segunda é melhor empregada quando o ambiente fabril tem muitas chegadas.

6.6.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Nesse período, mais características são tratadas e assim como verificado no estrato temporal anterior, há poucos trabalhos que tratam do modelo clássico de *Job Shop*. A preocupação em se estudar modelos em que se discute a questão das datas de entrega persiste nesse período e não se discute apenas a questão das datas de entrega dos itens, ao final do processo, como também há o interesse em se abordar a temática das datas de entrega das operações. A Figura 43 traz um panorama acerca das características dos itens estudadas no Segundo Período.

FIGURA 43 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

No tocante às datas de entrega, há que se destacar nesse período o trabalho de Phillipoom et al. (1989) que faz o estudo de um *Job Shop* multiestágio com operações de montagem. Nesse tipo de ambiente requer a coordenação adequada do fluxo de materiais entre os varios estágios necessários à conclusão do produto. Também se necessita considerar o tempo que os produtos podem ter de esperar por seus componentes paralelos necessários para que a montagem do item possa se iniciar, assim como o tempo de espera por uma estação de trabalho específica.

Os autores fazem um exame detalhado de diversos procedimentos resolutivos heurísticos para avaliar quais regras de sequenciamento são mais apropriadas para esse tipo de ambiente. Se os marcos de progresso (*progress milestones*) - definidos como os instantes em que as operações devem ser concluídas para que o progresso do item ao longo da linha seja suavemente conduzido em direção à data de entrega prometida – melhoram o desempenho das regras de sequenciamento. E se essas regras e marcos são sensíveis à estrutura do produto.

Foram testadas ao todo 14 heurísticas orientadas à data de entrega e cada procedimento é testado face a três métodos de definição de marcos de data de entrega a fim de controlar o progresso de um item em direção à sua conclusão, a saber, datas de entrega dos itens, data de entrega das operações e datas de entrega das operações de montagem.

6.6.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Esse período é marcado pela prevalência dos modelos clássicos face as demais características. Dos 43 artigos restritos a esse estrato, 17 trataram desse modelo. Outro ponto relevante é o aumento da diversidade de características estudadas, com destaque ao aumento de estudos pertencentes ao escopo da revisão que se detém ao estudo dos *setups*. A Figura 44 retrata esse período no tangente à métrica estudada.

FONTE: O Autor (2016).

Em relação ao modelo clássico, destaca-se aqui o trabalho de Dell'Amico e Trubian (1993), em que se aplica uma meta-heurística na resolução desse tipo de modelo. Neste trabalho, com o objetivo de minimizar o *makespan*, os autores resolveram 33 de 46 instâncias de maneira ótima. Para a instância de 10 itens e 10 máquinas de Muth e Thompson (1963), cujo valor ótimo para o *makespan* é 930, resolvido à otimalidade pela primeira vez por Carlier e Pinson (1989), a meta-heurística encontrou o valor de 935. A diferença é que o método exato levou cerca de cinco horas pra chegar ao ótimo, enquanto a meta-heurística levou 155,8 segundos em média para ficar a menos de um por cento do ótimo.

Em relação aos estudos que se dedicaram à análise dos tempos de preparação, há que se destacar os trabalhos de Low (1995) e Kim e Bobrowski (1995). O primeiro faz a construção de três cenários que são avaliados sob o prisma de três critérios de otimalidade (tempo médio de fluxo, atraso médio do item e tempo ocioso médio da máquina). No primeiro cenário, o tempo de preparação é dependente da sequência e o autor propõe uma heurística autoral destinada à resolução desse tipo de problema. No segundo, os itens tem *setups* independentes da sequência e no terceiro, não há tempos de preparação. O autor compara os resultados dos cenários e de seu algoritmo face a outras regras de sequenciamento, como MTP, EDD, entre outras.

No segundo artigo, os autores avaliam os mecanismos de liberação de itens e pedidos em um ambiente dinâmico e com tempos de preparação dependentes da sequência. Esse estudo se dedica a testar esses mecanismos em conjunto com as regras de sequenciamento, que são divididas em dois grupos: regras comuns, como a MTP; e regras orientadas ao *setup*, como a regra SIMSET (*Similar Setup*) proposta por Wilbrecht e Prescott (1969), que sempre seleciona o item com menor tempo de preparação. O ponto relevante desse trabalho é que não é discutida apenas a Programação da Produção a nível do chão de fábrica, onde se trata de questões correlatas ao sequenciamento dos itens, mas há aqui a preocupação de se avaliar operações a montante na cadeia produtiva, como o instante de chegada do item à fábrica e o instante de liberação deste à linha, que podem não ser coincidentes.

6.6.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Face ao número pronunciado de artigos e por extensão, de características de itens aqui encontradas, optou-se por estratificar a análise em duas partes, a fim de que as redes possam ser melhor visualizadas.

6.6.4.1 Quarto Período – Parte I

Em relação a esse primeiro estrato, a prevalência dos modelos clássicos persiste, mas outras características, como recirculação e sem espera são estudadas com maior frequência. Além disso outra variante do estudo dos tempos de preparação aparece dentre o rol de características nesse período apresentadas.

No tangente à recirculação, esta é trabalhada por quatro artigos. Dentre estes, destaca-se o de Pan e Chen (2005), em que se apresenta 6 formulações de programações inteiras e binárias na resolução de problemas desse tipo.

Na primeira formulação os autores estendem a formulação clássica de Manne (1960), incluindo nesta a possibilidade de recirculação, intitulada pelos autores como RJS-1. Na segunda (RJS-2) estende o modelo proposto por Liao e You (1992), que é um melhoramento de RJS-1.

O terceiro e quarto modelos são baseados no conceito de abordagem por divisão em camadas. Esse procedimento se subdivide em dois tipos, a saber, divisão em camadas por *backtracking* (LDB – *Layer Division by Backtracking*) e divisão em camadas por reentrada (LDR – *Layer Division by Reentering*). No primeiro o *backtracking* ocorre e uma nova camada é gerada se a operação de um item é pra ser processada em uma máquina com número maior que aquela em que se processa a operação imediatamente predecessora. Por exemplo, se uma operação vai ser processada primeiro na máquina 3 e depois na máquina 2, como 2 é menor que 3, ocorre *backtracking* e uma nova camada é criada.

Em relação à LDR, esta gera uma camada para um item se uma reentrada ocorre, isto é, se uma operação de um item visita a mesma máquina que qualquer outra operação nessa camada.

Desse modo, o RJS-3 é uma variação do RJS-1 admitindo-se as divisões por camadas, o que divide o RJS-3 em dois modelos: o RJS-3B (*backtracking*) e o RJS-

3R (reentrada). O mesmo ocorre com o RJS-4 (RJS-4B e RJS-4R), mas este é uma variação do RJS-2.

No que concerne a modelos sem espera, destaca-se, dentre os seis artigos que abordam tal característica aquele desenvolvido por Woeginger (2004), que prova a inexistência de PTAS para problemas desse tipo, visando à minimização do *makespan*.

Em relação ao tempo de preparação separável e dependente da sequência, este é estudado no artigo de Low et al. (2005). Nesse trabalho, os autores trabalham com uma abordagem multiobjetivo, em que simultaneamente se procura minimizar o tempo de fluxo total, o atraso total e o tempo ocioso da máquina.

A Figura 45 retrata as características dos itens atinentes a essa primeira parte.

FONTE: O Autor (2016).

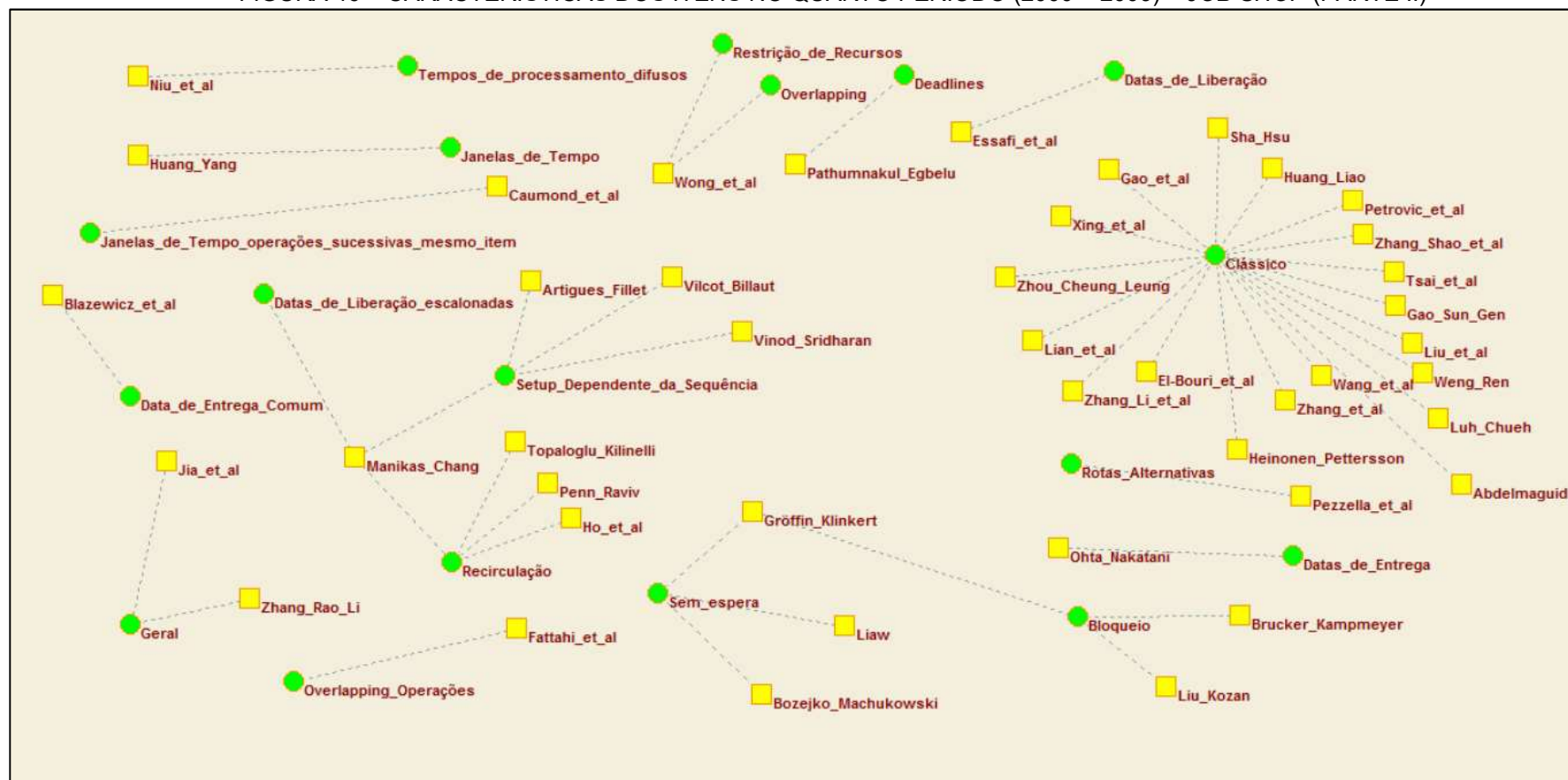
6.6.4.2 Quarto Período – Parte II

Em relação a esse período, tem-se a predominância da modelagem clássica e a presença de outras características, como tempos de processamento difusos e bloqueio.

No tangente aos tempos de processamento difusos, o artigo de Niu et al. (2008) descreve esses tempos como números difusos triangulares. O objetivo é encontrar uma sequência que minimize o *makespan* e a incerteza deste por meio de uma abordagem de ranqueamento dos números difusos. Para resolver esse problema, os autores utilizaram uma hibridação entre uma meta-heurística e os operadores, como a permuta (*crossover*) da outra.

No que concerne aos problemas de *Job Shop* com bloqueio, dos três artigos que versam sobre tal característica, destaca-se aquele de Liu e Kozan (2009) que aborda o problema da programação de trens como um problema de *Job Shop* com máquinas paralelas e bloqueio. O bloqueio é visto como o momento em que a linha férrea não pode liberar um trem até que a próxima seção do roteamento esteja disponível. A modelagem matemática desse problema foi tratada em seções anteriores dessa dissertação.

A Figura 46 traz a rede representativa desse período analisado.

FIGURA 46 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (PARTE II)

FONTE: O Autor (2016).

6.6.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Assim como no período anterior, em razão da grande quantidade de artigos e de características de itens, se teve de dividir a década em duas partes, que foram estratificadas em ordem cronológica do ano de publicação dos estudos. Dos 83 artigos, 41 foram analisados na primeira parte, enquanto estudou-se os 42 restantes na subseção seguinte.

6.6.5.1 Quinto Período – Parte I

Respectivo ao primeiro estrato desse período, tem-se como características marcantes a predominância dos modelos clássicos e o aumento da quantidade de publicações que tratam de questões correlatas à disponibilidade das máquinas.

Adibi et al. (2010) trabalha com um modelo dinâmico, caracterizado por chegadas e por quebras de máquinas aleatórias. Os autores empregam um VNS, cujos parâmetros são atualizados por uma Rede Neural Artificial a cada ponto de ressequenciamento. O tempo médio de reparo (MTTR – *Mean Time to Repair*) é de 300 unidades de tempo e o tempo médio entre falhas (MTBF – *Mean Time Between Failures*) é de 5700 unidades de tempo. O artigo trata de um modelo multiobjetivo que visa à minimização do *makespan* e do atraso total, por meio de uma função que faz a soma ponderada dos critérios.

Goren et al. (2012) também trabalham com o conceito de quebras aleatórias de máquinas. Neste artigo, há também considerações acerca da variabilidade dos tempos de processamento. Para os autores, uma boa atividade de *scheduling* deve atender ao binômio estabilidade-eficiência. Eficiência é medida em termos do objetivo tratado, no caso o *makespan*. E a estabilidade da programação é, sob o ponto de vista prático, a diminuição da diferença entre a programação planejada e aquela que é de fato realizada.

A Figura 47 traz as características abordadas na primeira parte do Quinto Período.

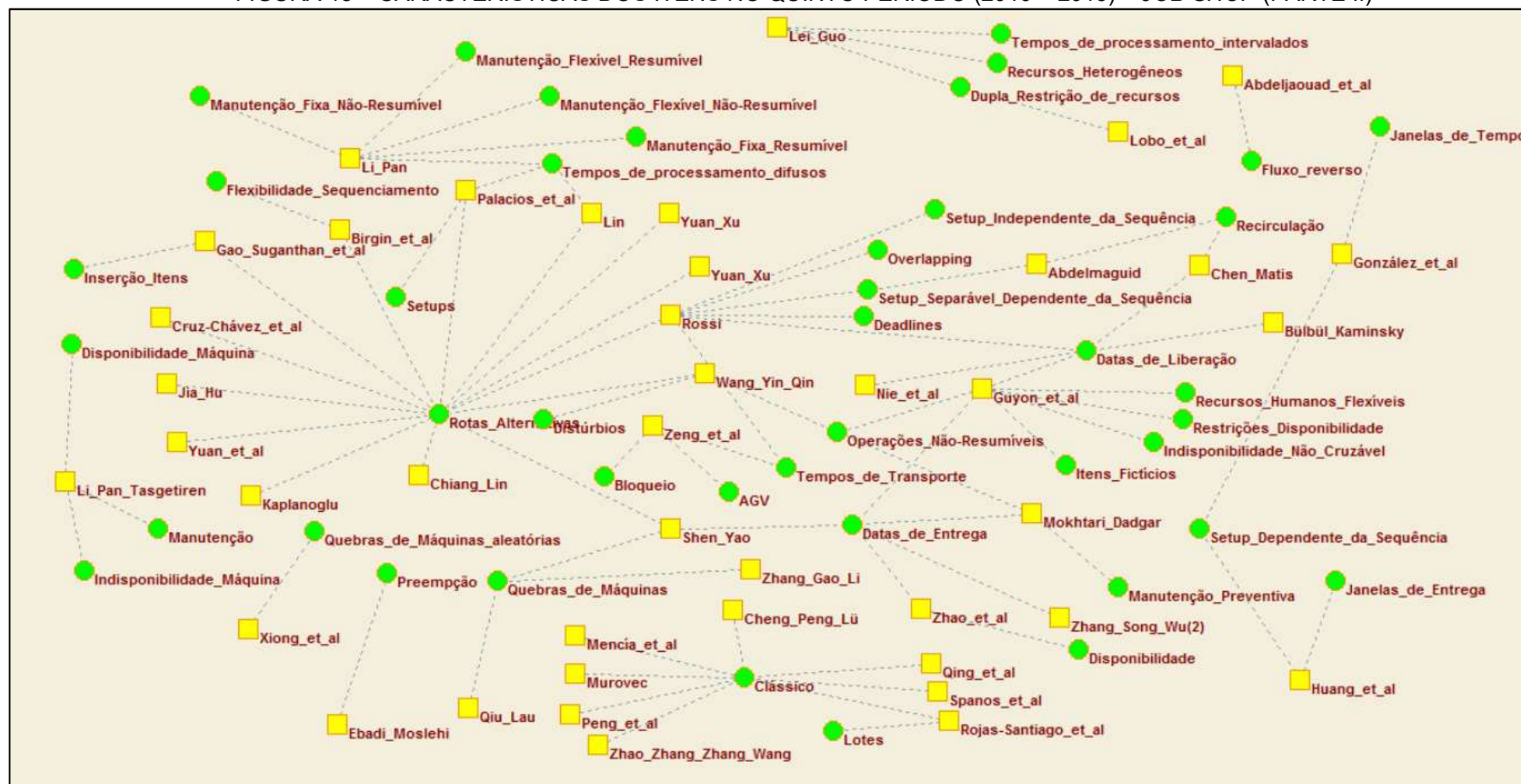


6.6.5.2 Quinto Período – Parte II

Essa segunda parte é marcada pelo crescimento dos modelos que se dedicam a trabalhar com as rotas alternativas de processamento, característica dos *Job Shops* flexíveis.

Kaplanoglu (2015) é um exemplo de artigo que utiliza essa característica. Nesse tipo de problema, há uma decisão adicional a ser tomada, que é a alocação de uma operação a uma máquina que pertence a um conjunto de máquinas capazes de realizar aquela operação. Além da decisão correlata à designação, existe a comum decisão de sequenciamento, que especifica a ordem de processamento das operações em cada máquina. Nesse artigo, o autor explora a faceta multiobjetivo do problema, em que se busca minimizar o *makespan*, a carga de trabalho da máquina mais carregada (carga máxima) e a carga de trabalho de todas as máquinas. O autor utiliza instâncias específicas da literatura voltadas ao problema de *Job Shop* flexível, como aquelas de Kacem, Hammadi e Borne (2002), com problemas com até 15 itens e 10 máquinas, para validar seu método que utiliza uma abordagem orientada a objeto (*object-oriented approach*) para modelar a complexa estrutura do *Job Shop* flexível, combinada à meta-heurística *Simulated Annealing*.

A Figura 48 traz essa e as demais características dos itens atinentes ao segundo estrato do Quinto Período scrutinizado.

FIGURA 48 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE II)

FONTE: O Autor (2016).

Em síntese, análise dessa métrica ao longo dos últimos 55 anos nos permite verificar a ampla gama de características já tratadas na literatura de *Job Shop*. No que tange às pesquisas futuras, nota-se uma maior preocupação com modelos mais complexos e próximos à realidade, como aqueles em que os tempos de preparação são dependentes da sequência, ou modelos que ponderem acerca da indisponibilidade das estações de trabalho, ou ainda modelos que tragam hibridações entre os ambientes fabris, como é o caso dos *Job Shops* flexíveis. Além disso, constata-se que a inclusão de mais características em cada modelo, ao passo que o torna mais complexo, também o torna mais conectado com a realidade e aplicabilidade práticas.

6.7 CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE

Essa seção dedicou-se à apresentação e análise dos critérios de otimalidade. Assim como no capítulo anterior, no que concerne à representação gráfica nas redes, os quadrados amarelos apresentam os autores e por extensão, os artigos, de cada década, enquanto os círculos verdes representam os critérios de otimalidade pelos autores empregados.

6.7.1 Primeiro Período (1960 – 1979)

Esse período é marcado por artigos que tratam mais de um objetivo e por poucos trabalhos que tratam como objetivo exclusivo a minimização do *makespan*. Além disso, nota-se a importância que os objetivos relacionados à data de entrega tem nesse período, representado graficamente na Figura 49.

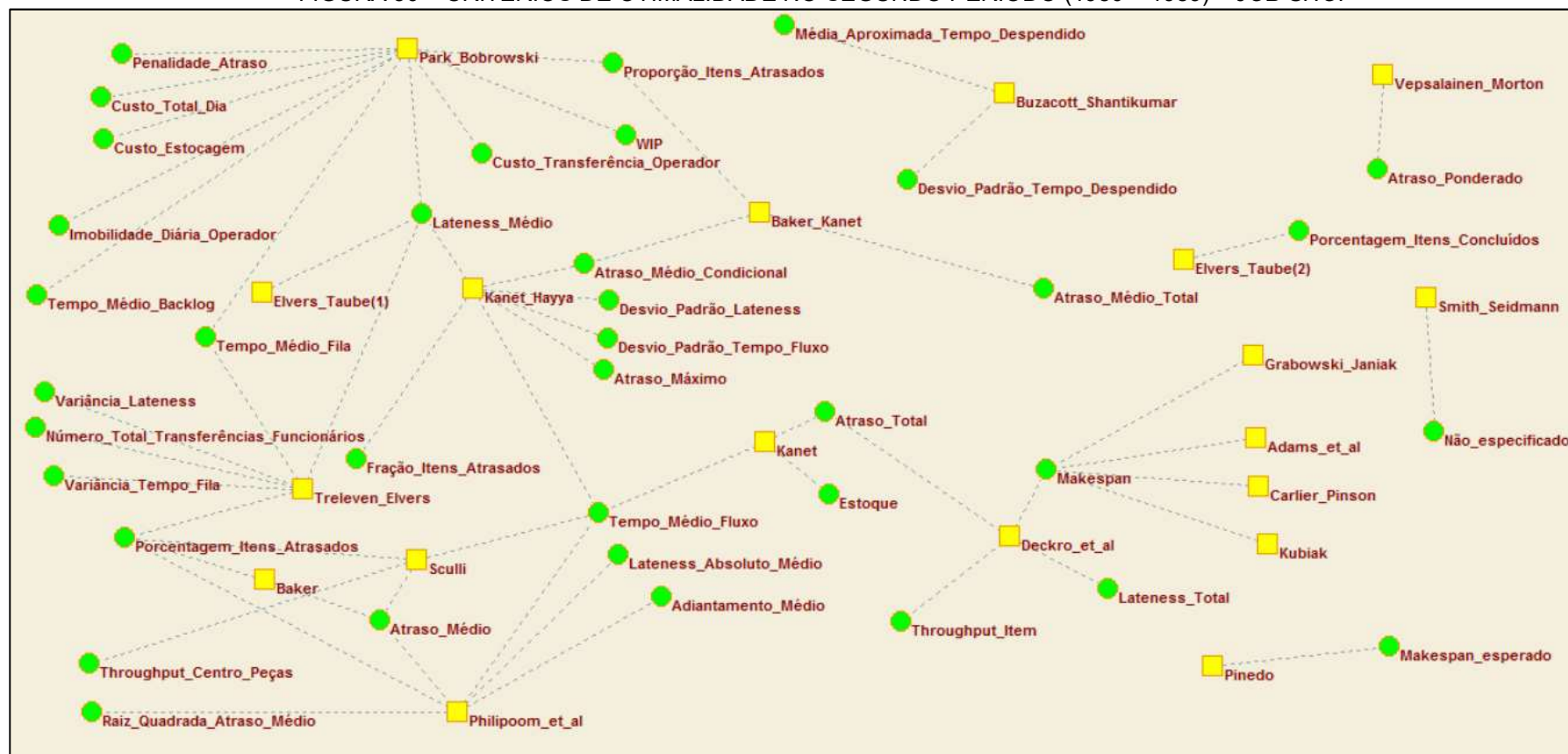
propostos pelo autor. Outro ponto relevante desse estudo é a utilização de modelos estocásticos na simulação e a utilização da distribuição binomial dos tempos de processamento.

6.7.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Assim como ocorre no período anterior, essa época tem como característica principal o estudo, por meio da simulação, de diversos critérios de otimalidade no mesmo artigo. Esses estudos revelam também uma preocupação mais relacionada à gestão, como a preocupação com os custos e estoques. Além disso, a se destacar a pouca quantidade de estudos (5) que estudam de modo exclusivo o *makespan*.

O artigo de Park e Bobrowski (1989) é um exemplo de estudo que se preocupa com os custos e tem diversos critérios de otimalidade estudados. Em seu trabalho, há um modelo com dupla restrição de recursos, em que se avalia a capacidade da máquina e a do operador. Os autores abordam em seu trabalho a questão da flexibilidade do operador, ou seja, sua capacidade de operar em mais de uma estação de trabalho, gerando cenários com diferentes níveis de flexibilidade do operador e com diferentes níveis de centralização do controle. Em relação a esse último, pode ser de modo centralizado, quando o operador está disponível para ser transferido de posto a cada item completado. Ou descentralizado, quando a fila de processamento da estação de trabalho corrente do operador está vazia.

Além do nível de centralização e da flexibilidade do operador, o estudo avaliou os mecanismos de liberação de pedidos, que foram tratados na métrica anterior. Os objetivos utilizados tratam, majoritariamente, da minimização de custos, divididos entre custos totais, custos de atraso (penalidades), custo de estocagem, transferência do operador entre estações de trabalho e além destes, há aqueles relacionados aos tempos avaliados, como tempo de espera, tempo no arquivo de reserva (*backlog file*). Outro objetivo interessante abordado nesse artigo é a questão da avaliação da imobilidade do operador, isto é, um índice para avaliar o número médio de ocorrências por dia que o operador não vai até outro centro de trabalho, mesmo que o seu esteja vazio naquele momento. A Figura 50 retrata esse período.

FIGURA 50 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.7.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Devido ao elevado número de critérios de otimalidade tratados nesse período, optou-se por estratificá-lo em duas partes. A primeira é formada pelo conjunto dos vinte e dois primeiros artigos, em ordem cronológica, publicados nesse período e pertencentes ao escopo da revisão. E o segundo estrato é composto pelos vinte e um estudos remanescentes.

6.7.3.1 Terceiro Período – Parte I

Nesse período, o *makespan* começa a ser o objetivo principal dos artigos respectivos ao *Job Shop*. O número de artigos que tratam de vários objetivos em um mesmo estudo também se reduz. Assim como verificado em outras décadas, a minimização do atraso, em suas diversas variantes, também tem considerável número de trabalhos que perpassam essa temática.

Em relação ao *makespan*, dos 22 artigos contidos nesse primeiro estrato, em 11 deles este critério de otimalidade é trabalhado. Dentre estes, se pode citar o trabalho de Applegate e Cook (1991) que desenvolve um método heurístico para construir sequências, um método de planos de corte (*cutting plane*) para obter *lower bounds* e um *Branch and Bound*. Usou-se o procedimento de otimização dos autores, que combina a heurística com o *Branch and Bound* em diversas instâncias da literatura. Dentre estas, a instância 10 x 10 de Muth e Thompson, chegando ao resultado ótimo em apenas 372 segundos.

Em relação aos trabalhos que tratam de objetivos concernentes ao atraso dos itens e suas variantes, há que se destacar o trabalho de Jensen et al. (1995) busca minimizar o atraso médio, a raiz quadrada do atraso médio e o tempo médio de fluxo. Além de trazer um objetivo pouco usual, que é a raiz quadrada do quadrado médio, o estudo dos autores é interessante em virtude de que os itens tem prioridade e importância diferentes, isto é, há itens que por conta da importância e do tamanho do cliente, não podem atrasar, enquanto outros de menor monta é possível tolerar até certo nível uma penalidade por atraso. O ponto fulcral do artigo é que as decisões de

sequenciamento são tomadas com base na importância que aquele item possui para a empresa.

O artigo de Abdallah (1995) deve ser destacado, posto que o autor doze critérios de otimalidade em seu estudo. Em seu trabalho, por meio de simulação do comportamento dos resultados de oito heurísticas de sequenciamento face a uma gama abrangente de critérios, que engloba tanto questões atreladas ao atraso de itens, como penalidade e número de itens atrasados, como questões de custo (espera, ociosidade, total), passando também por indicadores de eficiência operacional, como nível de utilização da máquina, número de itens concluídos, tempo total de espera, entre outros.

A Figura 51 traz a rede representativa dessa primeira parte do Terceiro Período, com os demais critérios que não foram aqui pormenorizados, mas que também foram contemplados nos 22 estudos contidos nesse estrato temporal.

FONTE: O Autor (2016).

6.7.3.2 Terceiro Período – Parte II

Nesse período há uma grupo de objetivos inusuais que são abordados, como factibilidade e do menor tempo computacional, minimização de atrasos e adiantamentos, variações do *lateness*. Há também um artigo que trata de vários objetivos em seu estudo, além de algumas variações para a minimização do *makespan*.

Os artigos de Sadeh et al. (1995) e Sadeh e Fox (1996) tem como foco a questão da factibilidade e do menor tempo computacional possível. Em ambos os trabalhos, trata-se a questão de janelas de tempo não-relaxáveis, isto é, o item deve ser concluído dentro de uma faixa de tempo específica. Usa-se como exemplo da aplicação desse tipo de característica a programação de missões espaciais, em que as janelas de tempo são determinadas por eventos astronômicos que não podem ser controlados.

Os estudos estipulam um número máximo de 500 estados de busca e em relação ao primeiro artigo, os autores também limitam o tempo computacional de resolução em 1800 segundos. Em ambos os estudos, outro ponto importante é a factibilidade da solução encontrada, pois as instâncias são divididas entre aquelas em que se obteve solução factível, se houve falha em achar a solução por conta das barreiras de tempo e número de estados de busca e se foi provada a infactibilidade do resultado encontrado.

O artigo de Luh et al. (1998) trata da questão dos atrasos e adiantamentos. Em seu modelo, os autores abordam questões referentes a tempos de preparação dependentes do grupo, isto é, os tempos de preparação de itens que são similares sob o prisma de algum critério (peso, diâmetro, comprimento) são menores do que itens que diferem significativamente em um ou mais desses critérios. O estudo dos autores também estipula limites de estocagem intermediária.

Os objetivos estão relacionados à minimização da soma quadrática e da soma ponderada dos atrasos da entrega do item final e adiantamentos advindos da entrega prematura de matéria-prima.

O artigo de Holthaus (1999) é um exemplo de artigo que contém diversos critérios de otimalidade nele englobados. Nesse trabalho, que versa sobre a questão de períodos de indisponibilidade das estações de trabalho, por meio de simulação, são avaliados sete objetivos, que são divididos em duas classes.

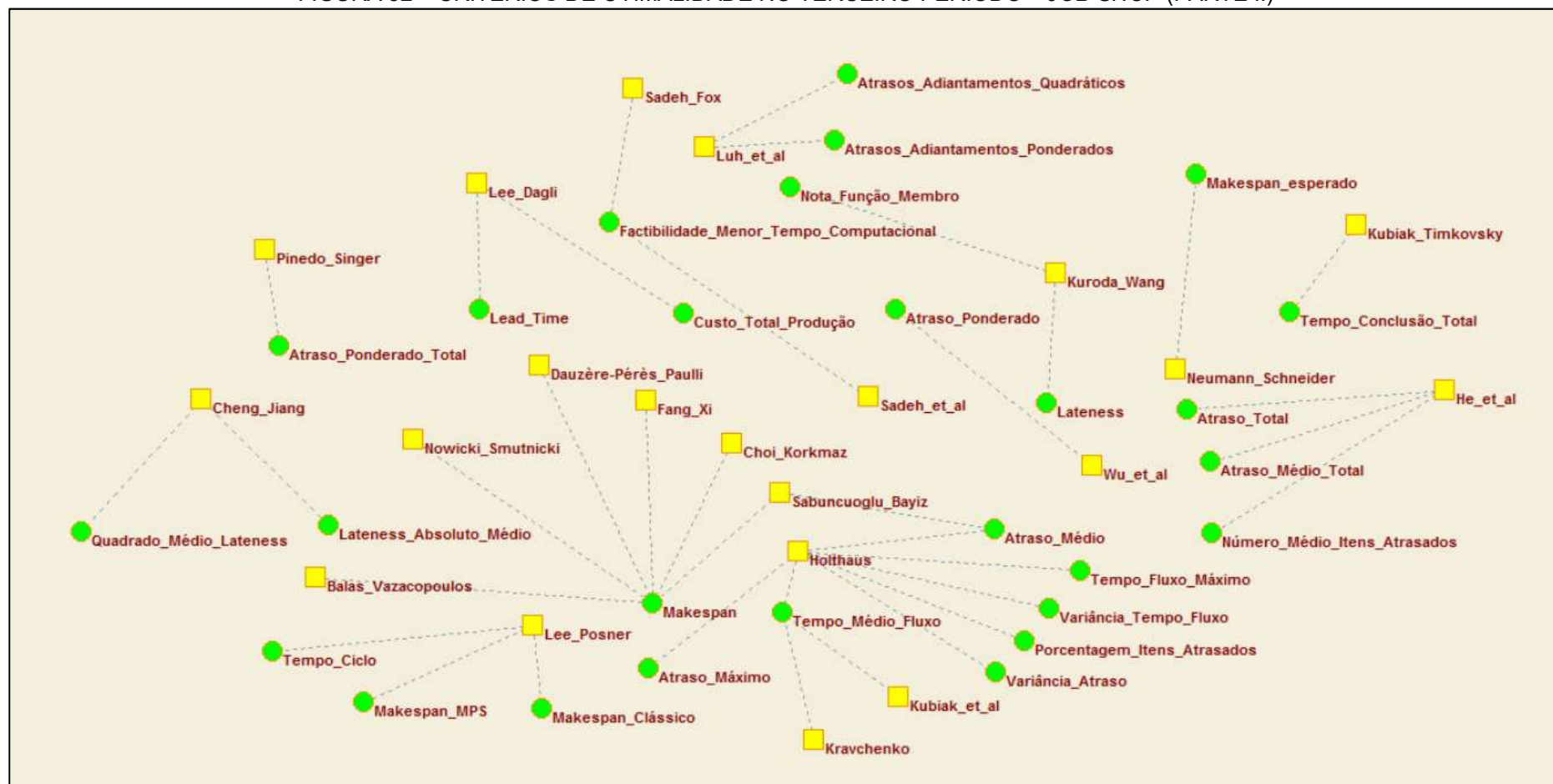
A primeira classe é referente aos objetivos relacionados ao tempo de fluxo, que são a minimização do tempo médio de fluxo; a minimização do tempo máximo de fluxo; e a minimização da variância do tempo de fluxo.

A segunda classe é concernente aos objetivos baseados na data de entrega, a saber, a minimização do percentual de itens atrasados; a minimização do atraso médio; a minimização do atraso máximo; e a minimização da variância do atraso.

Em relação as variações correlatas à minimização do *makespan*, há que se destacar os artigos de Lee e Posner (1997) e Neumann e Schneider (1999). O primeiro discute o problema do *Job Shop* periódico, onde uma mistura idêntica de itens, intitulada Conjunto Mínimo de Peças (MPS – *Minimal Part Set*), é produzida repetidamente. O autor tem como objetivos a minimização do *makespan* clássico, isto é, do instante de conclusão de todas as tarefas, mas também há a intenção de minimizar o *makespan* MPS, que é diminuir o tempo máximo de conclusão de um MPS. Por se tratar de um problema periódico, a minimização do tempo de ciclo também é contemplada.

No tangente ao segundo, os autores tratam de um modelo estocástico, cujo objetivo é a minimização do *makespan* esperado.

A Figura 52 traz a rede que representa graficamente os critérios de otimalidade estudados nessa segunda parte do Terceiro Período.

FIGURA 52 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO TERCEIRO PERÍODO – *JOB SHOP* (PARTE II)

FONTE: O Autor (2016).

6.7.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Assim como o período anterior, este também face ao número de critérios contemplados teve de ser estratificado em dois momentos. Dos 86 artigos aqui arrolados, os 43 primeiros são abordados na primeira parte e os 43 restantes, no segundo excerto do estudo.

6.7.4.1 Quarto Período – Parte I

Nesse período da análise, o *makespan* é cada vez mais tratado nos estudos. Há também abordagens multicritérios e em mais de um caso estudos que versam sobre muito objetivos.

Dentre os artigos que se dedicam ao estudo exclusivo correlato à minimização do *makespan*, se pode citar o trabalho de Gonçalves et al. (2005). Nesse estudo os autores abordam o modelo clássico de *Job Shop* e utilizam uma hibridação na resolução das instâncias de Fisher e Thompson (1963) e de Lawrence (1984), totalizando um conjunto de teste com 43 problemas. Para esse conjunto, os resultados alcançados foram ótimos ou quase ótimos, com uma média de 0,39% de desvio em relação ao melhor *makespan* encontrado até hoje.

O artigo de Esquivel et al. (2002) é aqui destacado, por conta do trabalhos dos autores ter contemplado tanto modelos de critério único, como abordagens multicritério. No tangente ao problema com critério único, o escolhido foi o *makespan*. Os autores testaram seu método meta-heurístico em seis instâncias de Lawrence, cuja solução ótima é conhecida e chegaram a esse resultado em 70% das ocasiões.

No que diz respeito ao modelo multiobjetivo, os autores consideraram a minimização do *makespan*, do adiantamento global e do tempo ponderado de conclusão. Esses objetivos são otimizados de forma agregada, ou seja, há uma soma ponderada entre os três critérios. Há também a abordagem multicritério que trabalha com a fronteira de Pareto. Para esse momento da análise, usou-se como critérios o *makespan* e o desvio absoluto médio dos tempos de conclusão dos itens em relação

a uma data de entrega comum (um objetivo relacionado a problemas de atrasos e, ou, adiantamentos).

O artigo de Lengyel et al. (2003) trabalha com nove critérios de otimalidade. São objetivos tratados pelo autor o *lateness* e suas variações (absoluto médio, máximo, mínimo, quadrado médio) além de taxas média e máxima de conclusão, somatório de itens concluídos, soma dos atrasos e somatório de penalidades.

O foco do problema a ser resolvido por esse trabalho é a entrega dos itens na data exata, por isso a preocupação com medidas derivadas do *lateness*, pois se busca a diminuição do *gap* entre o mínimo e máximo *lateness*, para que se minore o número de itens adiantados e, ou, atrasados.

A Figura 53 traz a rede representativa desse excerto analisado.



FONTE: O Autor (2016).

6.7.4.2 Quarto Período – Parte II

Nesse período, a prevalência do *makespan* se comparado aos demais objetivos aumenta, os modelos multiobjetivo aparecem em alguns trabalhos e abordagens diferentes referentes aos tempos de preparação são nesse estrato encontradas.

Em relação aos modelos multiobjetivo, destaca-se o trabalho de Gao, Sun e Gen (2008) que trabalharam com um *Job Shop* flexível. Nesse trabalho, os autores usaram uma função objetivo baseada na soma ponderada da minimização do *makespan*, da carga máxima de trabalho da máquina e da carga total de trabalho. A diferença desse trabalho é que há hierarquia entre os objetivos. A minimização do *makespan* é a função mais importante, seguida da minimização da carga máxima da máquina e a carga total das máquinas em último na escala de importância.

Em relação aos tempos de preparação, há que se ressaltar os artigos de Wong et al. (2009) e de Vinod e Sridharan (2008). No tangente ao primeiro, tem-se uma abordagem focada nos custos, prioritariamente, do *lateness*, mas há considerações acerca dos custos totais de *setup* e estocagem, além da minimização do *makespan*.

No que concerne ao segundo, estuda-se um modelo dinâmico de *Job Shop*, com considerações a respeito do *setup* dependente da sequência. Aqui, os autores focam nos tempos. Esses tempos são o tempo médio de fluxo e o tempo destinado aos *setups*. Outrossim, os autores também estudam o atraso médio e o número médio de *setups*.

A Figura 54 retrata esse último estrato do Quarto Período.

6.7.5 Quinto Período (2010 – 2015)

A análise desse período é dividida em dois momentos: a primeira parte contém 41 dos 83 artigos contidos nesse estrato temporal. A segunda parte contém os 42 restantes.

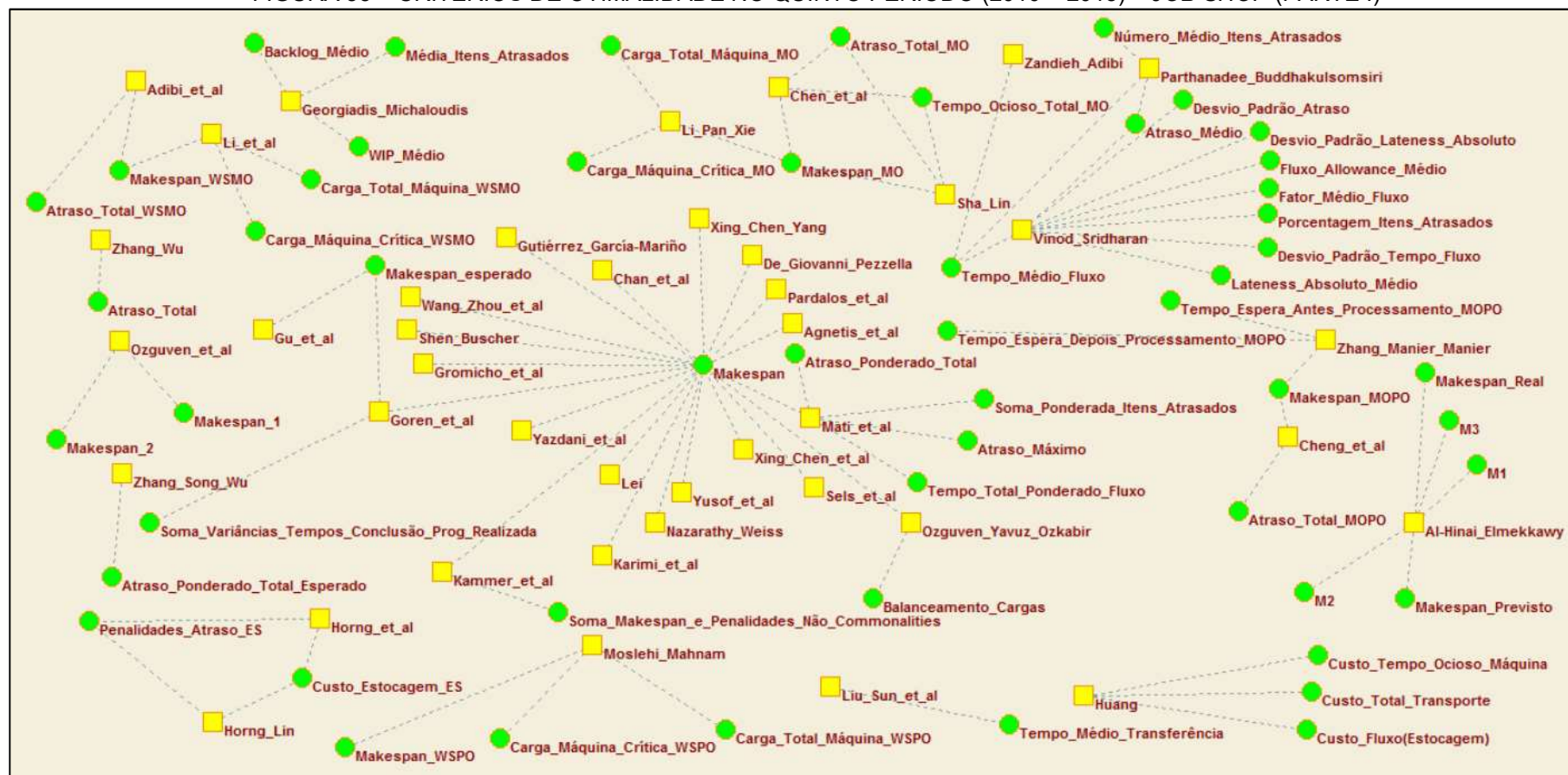
6.7.5.1 Quinto Período – Parte I

Esse período é marcado pela maior quantidade de artigos que versam sobre a minimização do *makespan*, do aumento do número de abordagens multiobjetivo e o trabalho de Al-Hinai e ElMekkawy (2011).

Em relação aos modelos multiobjetivo, os artigos de Moslehi e Mahnam (2011) e Li, Pan e Xie (2012) tratam do mesmo conjunto de objetivos (*makespan*, carga máxima da máquina e carga total das máquinas). A diferença é a abordagem empregada. No primeiro tem-se uma soma ponderada dos objetivos e a construção da fronteira de Pareto. No que diz respeito ao segundo, apenas a fronteira de Pareto é construída.

Em relação ao trabalho de Al-Hinai e ElMekkawy, este é relevante pois trata de um problema em que há várias medidas de desempenho bi-objetivo, sempre considerando a diferença entre o que é planejado e o que é de fato realizado. Para isso são sugeridas três medidas de estabilidade: M1 (diferença média entre os tempos de conclusão das operações planejados e os realizados); M2 (diferença entre os tempos de conclusão das operações planejados e os realizados); e M3 (diferença entre os tempos de conclusão entre as tarefas afetadas previstas e as de fato afetadas). As tarefas afetadas são aquelas que sofrem com o problema das quebras de máquinas a que o modelo também trata. Essas medidas de estabilidade são combinadas ao *makespan* (planejado e real), formando assim seis funções bi-objetivo.

A Figura 55 traz a representação por meio de redes dos critérios de otimalidade da primeira parte do Quinto Período.

FIGURA 55 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE I)

FONTE: O Autor (2016).

6.7.5.2 Quinto Período – Parte II

Nesse período, a predominância do *makespan* é latente, há dois trabalhos que abordam diversos objetivos e há um trabalho cuja preocupação é correlata com a questão ambiental.

O artigo de Mokhtari e Dadgar (2015) trata de um modelo estocástico de *Job Shop* flexível com taxas de falha das máquinas variável no tempo. Nesse trabalho, os autores trabalham com faixas de desempenho dos objetivos. Um exemplo é o número de itens atrasados, em que os experimentos são divididos entre aqueles que tiveram o melhor, o médio e o pior resultado. Nos demais critérios (*lateness* total, *makespan*, atraso máximo e tempo de conclusão total) apresentou-se apenas os melhores resultados.

O artigo de Qiu e Lau (2013) aborda um modelo dinâmico, estocástico e com quebras aleatórias de máquinas. Os autores empregam uma simulação, a fim de testar seu procedimento resolutivo que combina uma meta-heurística com regras de prioridade. São testadas nesse artigo 45 regras de prioridade. Em relação aos critérios de otimalidade tem-se: o atraso máximo, o *lateness* máximo, o tempo máximo de fluxo, a variância ponderada do atraso, a porcentagem de itens atrasados, o nível de utilização da máquina, a variância ponderada do *lateness*, o atraso ponderado médio, a variância ponderada do tempo de fluxo, o tempo ponderado médio de fluxo e o *lateness* médio ponderado.

O artigo de Lei e Guo (2015) deve ser destacado por conta de ser o único dentre os 240 artigos aqui analisados a fazer referência a um objetivo correlato à questão ambiental. Em seu trabalho, os autores tratam da minimização da pegada de carbono. Os autores utilizam uma modelagem multicritério em que além deste inédito objetivo também tem a finalidade de minimizar o *makespan*.

A Figura 56 traz o retrato dessa última análise correlata a essa métrica.

FONTE: O Autor (2016).

Em suma, no que concerne aos critérios de otimalidade, o que se verificou quando do estudo desta mesma métrica em relação ao *Flow Shop*, verifica-se no *Job Shop* também, que é a predominância do *makespan*, face aos outros critérios.

O que muda em relação a esse ambiente é a importância constante que é dada aos objetivos baseados em datas de entrega, como o atraso, o *lateness* e suas variações. Em relação a pesquisa futura, constata-se a tendência de se trabalhar cada vez mais com modelos multiobjetivo e com ambientes flexíveis, pois estes são mais próximos do que é verificado na realidade.

Outro ponto a ser explorado no futuro é concernente ao exíguo número de artigos que tratam das questões ambientais, posto que este pode ser um nicho interessante para trabalhos a ser publicados, pois a gama de possibilidades que podem ser abordadas sob esse prisma é vasta, como considerações acerca da eficiência energética e, até como no artigo supracitado, a preocupação com as pegadas de carbono.

6.8 TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS

No tangente a essa métrica, assim como nas demais, dividiu-se a análise em cinco períodos. Nas redes a seguir, apresentou-se os métodos e os autores e, por conseguinte, os artigos. Estes últimos estão simbolizados por quadrados amarelos, enquanto os tipos de métodos seguem a mesma representação utilizada no capítulo anterior, quando do escrutínio de tal métrica no ambiente *Flow Shop*.

6.8.1 Primeiro Período (1960 – 1979)

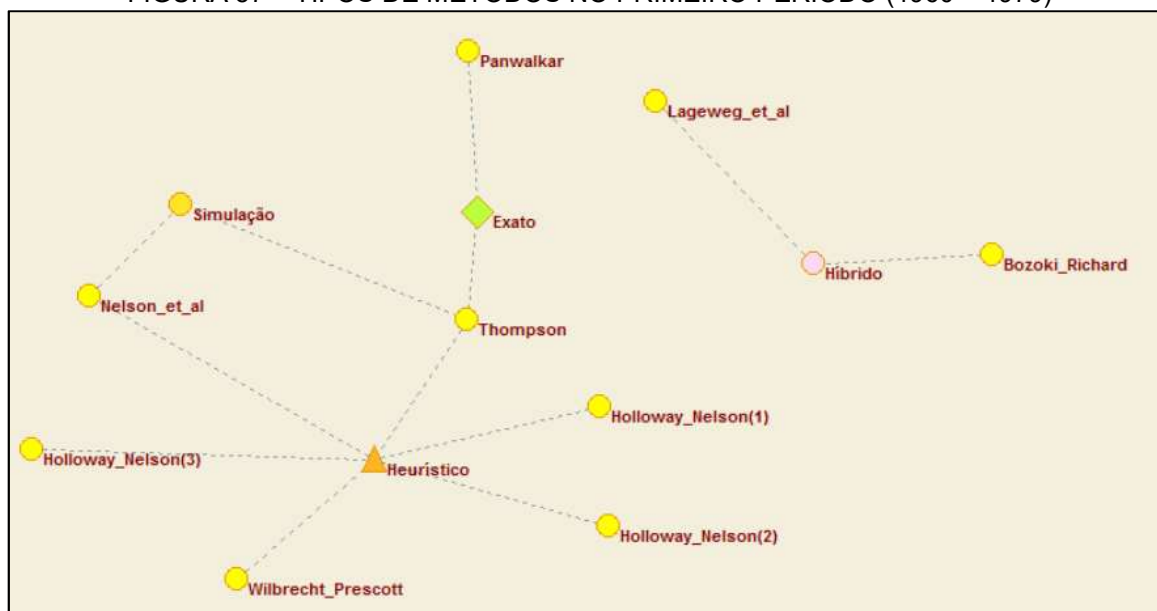
Esse período tem como destaque a utilização maior de heurísticas e a utilização de hibridações já nesta época, algo que não foi verificado até o Terceiro Período nos artigos analisados de *Flow Shop*.

No que concerne ao uso de heurísticas, o artigo de Nelson et al. (1977) se pode citar como um exemplo dessa utilização. Nesse trabalho, os autores fazem uso da simulação para gerar diferentes cenários e testar o desempenho de diversos métodos heurísticos, tanto clássicos como autorais em um *Job Shop* dinâmico e estocástico.

Em relação às hibridações, há duas publicações que tratam da temática. O artigo de Bozoki e Richard (1970) faz duas hibridizações, combinando um método exato a uma heurística, em um *Job Shop* de processamento contínuo, em que as máquinas associadas a um determinado item devem ser todas usadas simultaneamente para a conclusão deste item.

O artigo de Lageweg et al. (1977), assim como o estudo anterior, constroi dois métodos híbridos, a partir da combinação de um método exato a uma heurística, sendo que aqui estas são autorais. Em ambos os problemas, tem-se como objetivo a minimização do *makespan*. A Figura 57 traz a representação gráfica do Primeiro Período concernente ao tipo de método resolutivo.

FIGURA 57 – TIPOS DE MÉTODOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

6.8.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Esse período é marcado pelos artigos que tratam, de modo conjunto a simulação e o uso de heurísticas em seus processos resolutivos. Além disso, dois artigos merecem destaque por conta de sua representação na rede como RP, inusada quando da análise realizada no capítulo precedente.

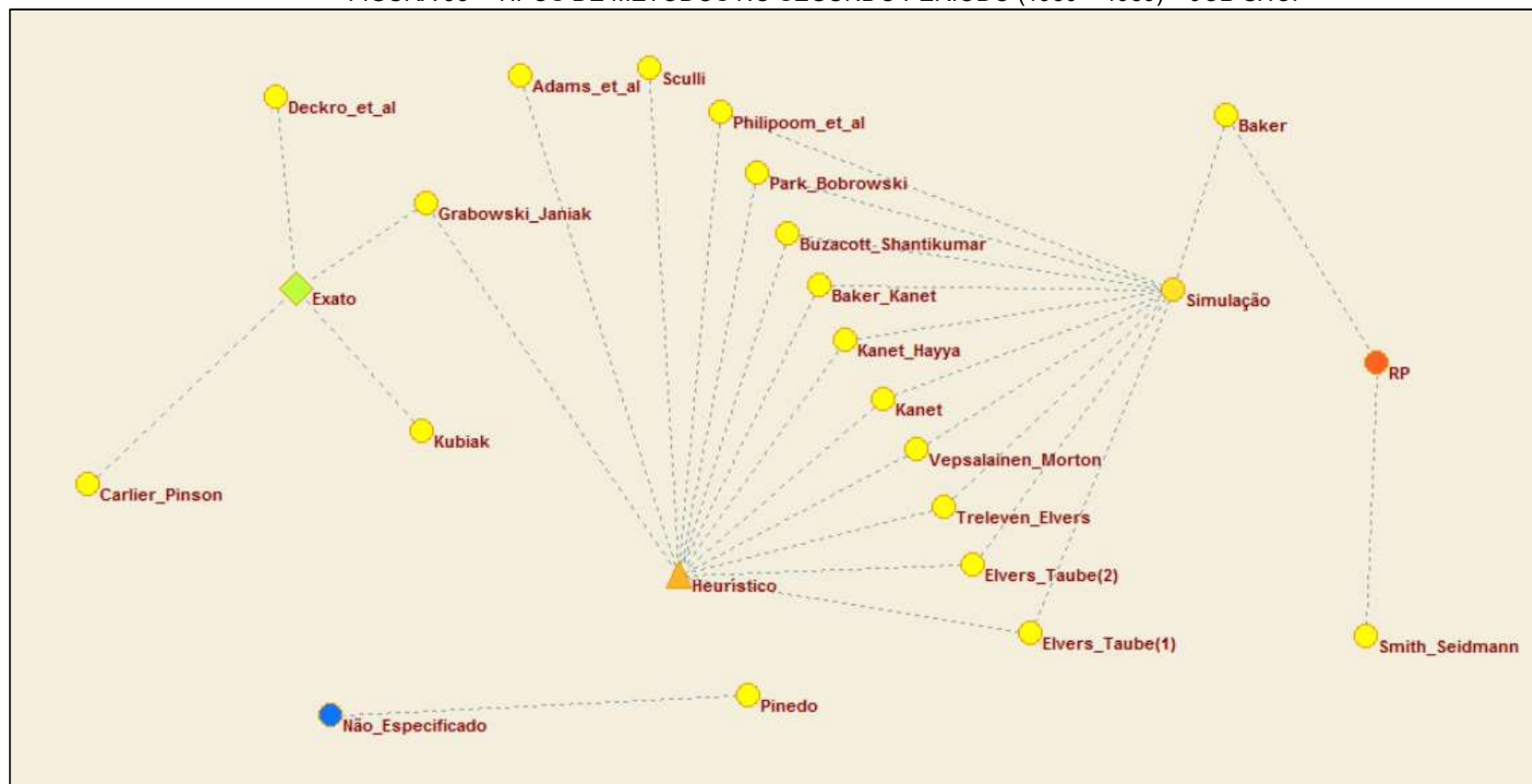
No que diz respeito a estudos que utilizaram concomitantemente a simulação e os métodos heurísticos, tem-se dez artigos aqui categorizados. Destes, se pode citar

o artigo de Buzacott e Shantikumar (1985), que tratou da temática do *Job Shop* dinâmico e estocástico, a fim de minimizar a média aproximada e o desvio padrão do tempo despendido na linha. Os autores utilizam diferentes cenários, com distintas distribuições de probabilidade da chegada dos itens e as simulam usando algumas regras de sequenciamento, que são testadas com a finalidade de minimizar os objetivos já mencionados.

No tangente à representação RP na rede correlata a essa década, esta significa Regra de Prioridade. Esta designação foi utilizada para classificar o tipo de método usado nos artigos de Smith e Seidmann (1983) e Baker (1984). No primeiro, os autores realizam um *survey* dos métodos de seleção de data de entrega, em que se abordam as diversas heurísticas existentes, classificando-as em procedimentos diretos, procedimentos heurísticos e procedimentos analíticos, mas não há nem o teste de tais métodos como não há a proposição de outros. O que faz-se nesse trabalho é a arrolagem de procedimentos e classificação, sob a ótica dos autores, desses métodos.

No segundo, o autor trata de objetivos específicos em seu estudo, que são o atraso médio e a porcentagem de itens atrasados. Assim como no primeiro, estuda-se regras de sequenciamento com o foco nas datas de entrega. A diferença é que faz-se a aplicação das heurísticas apresentadas na fração *survey* do artigo por meio de uma simulação, em que se testa o desempenho desses métodos na minimização dos objetivos apresentados.

A Figura 58 retrata esse período no que tange aos tipos de métodos pelos autores empregados.

FIGURA 58 – TIPOS DE MÉTODOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.8.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Face ao incremento considerável do número de artigos encontrados a partir dessa década se comparado às anteriores, o número de métodos, especialmente as heurísticas, acompanhou o crescimento verificado no número de publicações. Em razão disso, optou-se por dividir a análise desse estrato em dois momentos: o primeiro traz a análise exclusiva dos métodos heurísticos. O segundo menciona os demais tipos de métodos nessa década encontrados.

6.8.3.1 Métodos heurísticos

Nesse período, dos 43 artigos analisados, 35 destes utilizaram, de maneira exclusiva, ou não, métodos heurísticos em seus processos resolutivos. Destes, se pode citar o trabalho de Lourenço (1995), que utilizou 14 heurísticas em seu estudo. Nesse artigo, a autora testou algumas instâncias clássicas da literatura, como MT (Muth e Thompson) (1963), ABZ (Adams, Balas e Zawack) (1988), ORB1 (Applegate e Cook) (1991), LA (Lawrence) e de CAR (Carlier) (1989), para problemas de até 15 itens e 15 máquinas, com a finalidade de minimizar o *makespan*.

O Quadro 21 retrata esse estrato da análise, em que se apresenta os autores e, por extensão, os artigos e o número de citações destes de acordo com a *Web of Science*, *Scopus* ou *Google Scholar*.

QUADRO 21 – AUTORS QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP* (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Scudder et al. (1990)	14
Applegate; Cook (1991)	443
Wein; Ou (1991)	6
Gravel et al. (1992)	20
Wein; Chevalier (1992)	81
Adam et al. (1993)	32
Amico; Trubian (1993)	355
Brandimarte (1993)	330
Kanet; Zhou (1993)	1

QUADRO 21 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP* (CONCLUSÃO)

Melnyk et al. (1994)	1
Abdallah (1995)	4
Barnes; Chambers (1995)	75
Dorndorf; Pesch (1995)	208
Golenko-Ginzburg et al. (1995)	17
Herrmann et al. (1995)	0
Jensen et al. (1995)	20
Kim; Bobrowski (1995)	29
Low (1995)	9
Lourenço (1995)	96
Sadeh et al. (1995)	30
He et al. (1996)	20
Kubiak et al. (1996)	49
Nowicki; Smutnicki (1996)	578
Sadeh; Fox (1996)	98
Choi; Korkmaz (1997)	34
Dauzère-Pérès; Paulli (1997)	196
Fang; Xi (1997)	60
Balas; Vazacopoulos (1998)	211
Cheng; Jiang (1998)	31
Luh et al. (1998)	47
Wu et al. (1999)	70
Holthaus (1999)	75
Neumann; Schneider (1999)	4
Pinedo; Singer (1999)	67
Sabuncuoglu; Bayiz (1999)	106

FONTE: O Autor (2017).

6.8.3.2 Outros métodos

Em relação aos outros métodos, destaca-se a grande utilização da simulação e dos métodos meta-heurísticos nessa década. Destaca-se também a presença de hibridações, inauditas deste o Primeiro Período no que tange ao ambiente fabril neste capítulo tratado.

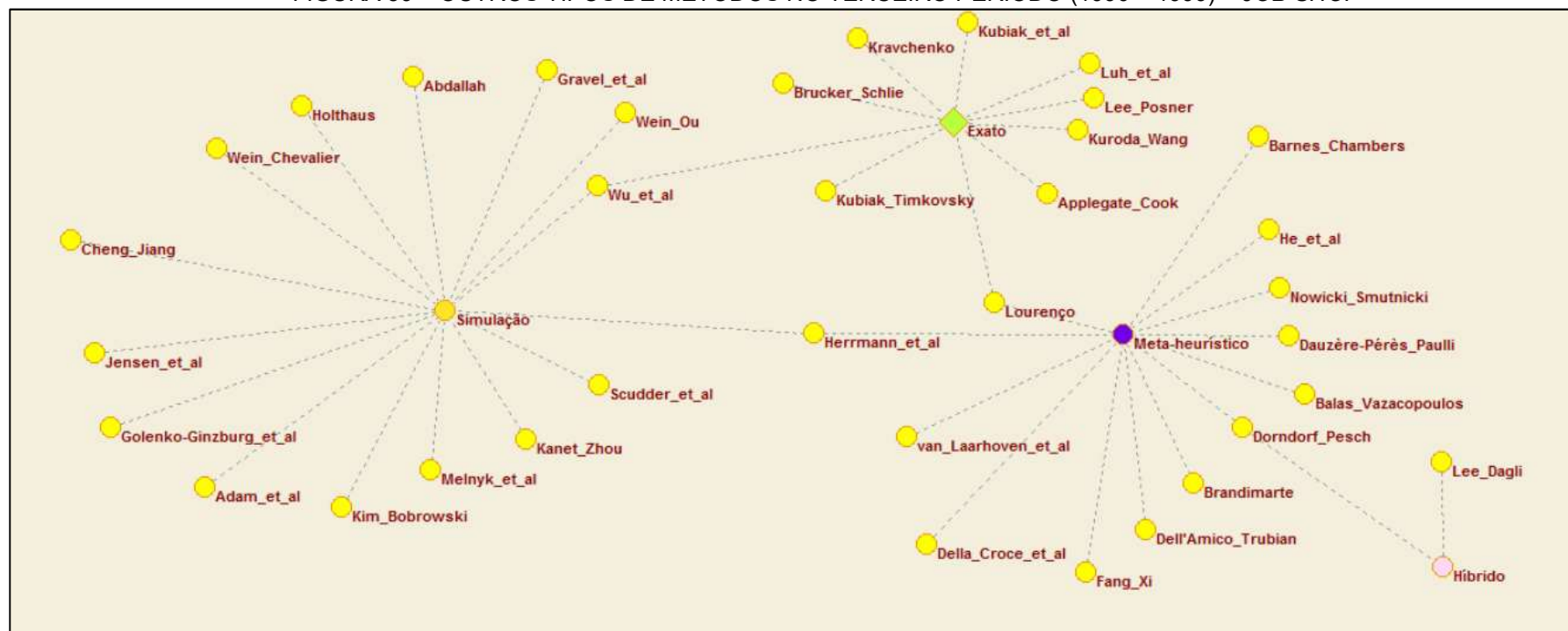
No que tange ao uso da simulação, se pode citar o artigo de Golenko-Ginzburg et al. (1995), que trabalha a simulação de diferentes cenários relativos a um *Job Shop* estocástico, em que se testa três tipos de distribuição de probabilidades (uniforme, exponencial e normal) dos tempos de processamento, combinadas cada uma a duas regras heurísticas autorais, a fim de minimizar o *makespan* e avaliar o desempenho de entrega dos itens, isto é, se estes estão sendo entregues na data prometida ao cliente.

No que concerne às meta-heurísticas, destaca-se o artigo de Van Laarhoven et al. (1992) que utiliza esse tipo de método na resolução de um modelo clássico de *Job Shop*, visando à minimização do *makespan*, utilizando instâncias clássicas da literatura, em problemas de até 15 máquinas e 15 itens.

Respectivo ao uso de hibridações, tem-se dois artigos. No primeiro, Dorndorf e Pesch (1995), combinam uma heurística a uma meta-heurística na resolução de um modelo clássico de *Job Shop*, a fim de minimizar o *makespan*, utilizando dados advindos das instâncias clássicas da literatura.

No segundo, Lee e Dagli (1997) combinam duas meta-heurísticas em um modelo clássico, visando à minimização do *lead time* e dos custos totais de produção. Nesse artigo compara-se o desempenho da hibridação proposta com aqueles obtidos por heurísticas clássicas de sequenciamento, no que tange à otimização dos critérios citados. Os resultados apontam a prevalência da metodologia resolutiva empregada pelos autores se comparado às heurísticas

A Figura 59 retrata a terceira década no que concerne aos tipos de métodos resolutivos diversos do heurístico.

FIGURA 59 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.8.4 Quarto Período (2000 – 2009)

O número de publicações desse período duplica se comparado ao número de artigos analisados correlatos o terceiro estrato temporal. Por conseguinte, os autores exploram muitos métodos resolutivos. De modo a facilitar a visualização das redes no que diz respeito aos tipos de métodos resolutivos, estratificou-se o período analisado em quatro momentos: os dois primeiros são respectivos aos métodos heurísticos, o terceiro em relação aos procedimentos resolutivos meta-heurísticos e o quarto respectivo aos outros métodos.

6.8.4.1 Métodos heurísticos – Parte I

Devido ao grande número de autores que utilizam em algum momento dos seus estudos esse tipo de método, optou-se por segmentá-lo em dois estratos. Aqui representados estão os 43 primeiros artigos, em ordem cronológica, desse período.

No que concerne a estes trabalhos, destaca-se aquele de Litchfield e Narasimhan (2000), em que se testa a modificação de uma heurística de sequenciamento clássica em um *Job Shop* com lotes de transferência (*transfer batches*), que é a quantidade de itens movida de estação de trabalho a estação de trabalho. Essa modificação visa à prevenção de *setups* desnecessários. Os critérios de otimalidade aqui estudados são o tempo médio de fluxo, a variância do tempo de fluxo e o *lateness* médio.

O Quadro 22 traz os artigos que usaram métodos heurísticos na primeira parte do Quarto Período.

QUADRO 22 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – <i>JOB SHOP</i> (PARTE I) (CONTINUA)	
Autor	Número de Citações
Litchfield; Narasimhan (2000)	9
Pezzella; Merelli (2000)	146
Boudoukh et al. (2001)	10
Cheung; Zhou (2001)	64
Yang; Wang (2001)	54

QUADRO 22 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (PARTE I) (CONCLUSÃO)

Zhou et al. (2001)	63
Asano; Ohta (2002)	31
Dai; Weiss (2002)	29
Golenko-Ginzburg; Gonik (2002)	37
Mascis; Pacciarelli (2002)	202
Sabuncuoglu; Comlekci (2002)	33
Bertsimas et al. (2003)	21
Chen; Luh (2003)	60
Lengyel et al. (2003)	18
Schuster; Framinan (2003)	92
Mattfeld; Bierwirth (2004)	130
Meloni et al. (2004)	28
Sung Lee et al. (2004)	20
Woeginger (2004)	15
Alvarez-Valdes et al. (2005)	36
Cavory et al. (2005)	25
De Bontridder (2005)	26
Gonçalves et al. (2005)	302
Hurink; Knust (2005)	49
Jansen et al. (2005)	30
Low et al. (2005)	18
Tavakkoli-Moghaddam; Daneshmand-Mehr (2005)	36
Zoghby et al. (2005)	20
Framinan; Schuster (2006)	35

FONTE: O Autor (2017).

6.8.4.2 Métodos heurísticos – Parte II

Em relação a esse período, há uma menor quantidade de autores que utilizam métodos heurísticos do que é verificado no primeiro estrato dessa década. Destes artigos pertencentes a esse estrato da análise, se pode citar aquele de Topaloglu e Kilincli (2009), que trata de um *Job Shop* com recirculação, visando à minimização do *makespan*. Para isso, os autores utilizam diversos métodos heurísticos, autorais ou não, para problemas de até 100 itens e 20 máquinas.

Além dessa perspectiva mais voltada à teoria e ao mundo acadêmico, os autores também aplicam esse estudo a um caso real, no setor de tingimento em uma fábrica têxtil. Nessa fábrica, tem-se 20 máquinas diferentes e cada uma delas realiza uma tarefa específica. Os passos para a produção de cada tipo de tecidos são distintos, mas a fabricação de todos eles se inicia na calandra e se encerra na máquina de controle de qualidade dos tecidos. O número de operações por item gravita entre 8 e 17.

A capacidade dessa instalação de tingimento é de 1.000.000 de metros de tecido por mês, operando 24 horas por dia 7 dias por semana. Em um dia comum nesse ambiente produtivo, mais de 100 itens e 1000 operações devem ser programadas nas 20 máquinas.

O Quadro 23 traz apresenta a utilização desse tipo de método resolutivo na segunda parte do quarto período.

QUADRO 23 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (PARTE II) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Ohta; Nakatani (2006)	16
Pathumnakul; Egbelu (2006)	19
Ren; Weng (2006)	10
Sha; Hsu (2006)	189
Brucker; Kampmeyer (2007)	15
Heinonen; Pettersson (2007)	68
Ho et al. (2007)	127
Petrovic et al. (2007)	27
Zhang et al. (2007)	110
Caumond et al. (2008)	38
Huang; Liao (2008)	154
Liaw (2008)	13
Pezzella et al. (2008)	346
Vinod; Sridharan (2008)	33
Zhang et al. (2008)	3
Abdelmaguid (2009)	4
Manikas; Chang (2009)	30
Penn; Raviv (2009)	1

QUADRO 23 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – <i>JOB SHOP</i> (PARTE II) (CONCLUSÃO)	
Topaloglu; Kilincli (2009)	12
Wong et al. (2009)	28
Xing et al. (2009)	72
Zhou et al. (2009)	78

FONTE: O Autor (2017).

6.8.4.3 Métodos meta-heurísticos

Em relação a esse tipo de método, verifica-se a utilização deste em um número considerável de artigos (42 dos 86 trabalhos). Destes, se pode citar o estudos de Hurink e Knust (2005). Neste, os autores utilizam o método meta-heurístico na resolução de um *Job Shop* em que os itens são transportados entre as máquinas por um robô de transporte único (*single transport robot*).

Trata-se de uma generalização do modelo clássico, posto que os tempos de transporte entre as estações de trabalho, ao contrário do que é disposto nos pressupostos clássicos da Programação da Produção, não são desprezíveis. Além disso, como o autômato pode transportar apenas um item de cada vez, os tempos em que este se movimenta vazio também devem ser levado em consideração.

O objetivo dos autores é minimizar o *makespan*. Para isso, adota-se três procedimentos meta-heurísticos. O primeiro é uma abordagem de otimização de um estágio, em que o problema é tratado de forma holística, não havendo distinção do que é máquina (estação de trabalho) e o que é robô. O segundo é uma abordagem de otimização em dois estágios, em que o roteiro dos itens nas máquinas é fixado em um primeiro momento e a partir disso se constrói um roteiro apropriado para o robô. E o terceiro é uma combinação das duas abordagens.

Os autores testam os seus métodos resolutivos nas instâncias clássicas da literatura, que são adaptadas a partir da adição dos tempos de transporte dos robôs, bem como o tempo em que este se movimenta vazio.

O Quadro 24 que apresenta os autores e o número de citações de seus estudos que utilizaram tal tipo de método no Quarto Período.

QUADRO 24 – AUTORES QUE UTILIZARAM META-HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Pezzella; Merelli (2000)	97
Cheung; Zhou (2001)	64
Wang; Zheng (2001)	209
Yang; Wang (2001)	54
Zhou et al. (2001)	63
Esquivel et al. (2002)	35
Steinhöfel et al. (2002)	16
Tarantilis; Kiranoudis (2002)	22
Yoshitomi (2002)	32
Kis (2003)	44
Schuster; Framinan (2003)	92
Yoshitomi; Yamaguchi (2003)	30
Mattfeld; Bierwirth (2004)	130
Meloni et al. (2004)	28
Sung Lee et al. (2004)	20
Cavory et al. (2005)	25
De Bontridder (2005)	26
Hurink; Knust (2005)	49
Nowicki; Smutnicki (2005)	163
Zhou et al. (2005)	25
Framinan; Schuster (2006)	35
Lian et al. (2006)	84
Brucker; Kampmeyer (2007)	15
El-Bouri et al. (2007)	28
Heinonen; Pettersson (2007)	68
Ho et al. (2007)	127
Petrovic et al. (2007)	27
Tsai et al. (2007)	63
Zhang et al. (2007)	110
Caumond et al. (2008)	38
Huang; Liao (2008)	154
Huang; Yang (2008)	32
Liaw (2008)	13
Pezzella et al. (2008)	346
Zhang et al. (2008)	34
Fattahi et al. (2009)	34

QUADRO 24 – AUTORES QUE UTILIZARAM META-HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (CONCLUSÃO)

Luh; Chueh (2009)	62
Manikas; Chang (2009)	30
Wang et al. (2009)	12
Wong et al. (2009)	28
Xing et al. (2009)	72
Zhou et al. (2009)	78

FONTE: O Autor (2017).

6.8.4.4 Outros métodos

Em relação aos demais tipos de métodos resolutivos, tem-se como característica relevante a prevalência das hibridações, face aos restantes aqui classificados. Outrossim, há que se destacar também a utilização de métodos exatos, com 12 dos 86 artigos desse estrato temporal utilizando, de maneira exclusiva ou não, tal tipo de procedimento resolutivo.

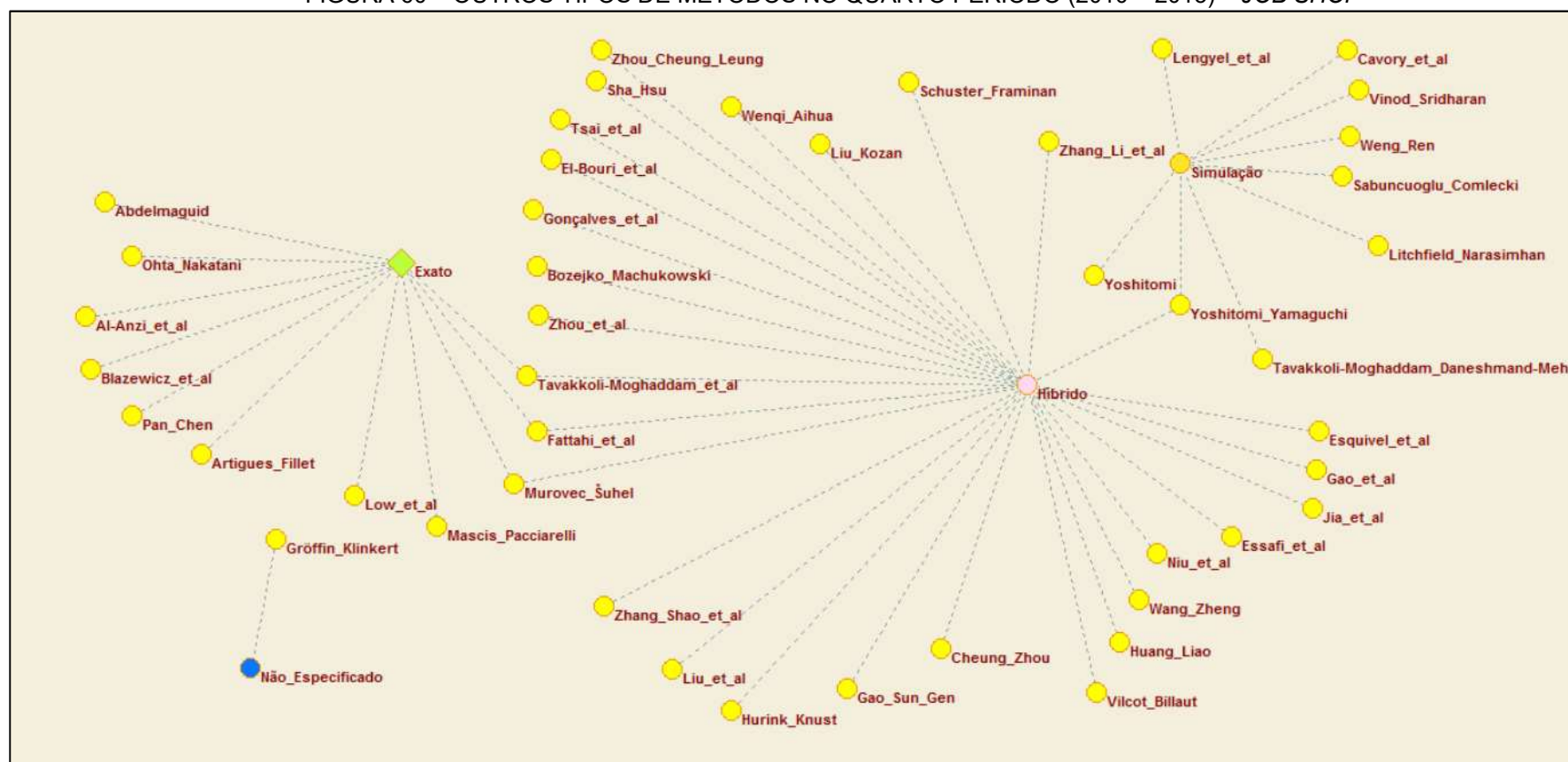
No concernente às hibridações, destaca-se aquela proposta em Vilcot e Billaut (2008), que utilizam a combinação de duas meta-heurísticas na resolução de um *Job Shop* com tempos de preparação dependentes da sequência, visando à minimização de dois critérios, a saber, o *makespan* e o *lateness* máximo, em que os autores estão interessados em encontrar uma aproximação para a fronteira de Pareto.

Em relação aos artigos que trataram em algum momento de suas análises acerca da utilização de metodologia exata na resolução de problemas correlatos ao ambiente fabril objeto do estudo deste capítulo, se pode citar o trabalho de Artigues e Feillet (2008), que versaram sobre um *Job Shop* com tempos de preparação dependentes da sequência. Nesse artigo, os autores propõem um método em que se pretende resolver à otimalidade a minimização do *makespan*.

Outro trabalho a ser destacado nesse período é aquele de Gröflin e Klinkert (2007), que não trabalha com um tipo de método específico, mas que traz uma importante pesquisa acerca do campo da inserção de itens em programações já estabelecidas, característica fundamental de ambientes dinâmicos. Nesse trabalho,

os autores abordam uma série de *Job Shops* em que tal característica pode ser encontrada, como *Job Shop* com bloqueio, além de versar sobre tipos de inserção.

A Figura 60 retrata esse período, no que diz respeito aos métodos diversos dos heurísticos e meta-heurísticos encontrados na quarta década analisada.

FIGURA 60 – OUTROS TIPOS DE MÉTODOS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.8.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Assim como o período anterior, este também foi dividido em quatro partes, com as duas primeiras dedicadas ao método heurístico, a terceira voltada aos artigos que contemplaram métodos híbridos e a quarta cujo foco são os demais tipos de métodos resolutivos.

6.8.5.1 Método heurístico – Parte I

Nessa primeira parte dedicada a esse tipo de método, avaliou-se os 41 primeiros artigos, em ordem cronológica, associados a esse período. Destes estudos, se pode citar aquele desenvolvido em Parthanadee e Buddhakulsomsiri (2010), que trata de um modelo dinâmico, estocástico, com tempos de *setup* dependentes da sequência e com datas de entregas das operações.

Os autores utilizaram nove métodos heurísticos em um estudo de caso real, em uma fábrica de frutas em conserva. Os objetivos a ser otimizados são o tempo médio de fluxo, o número de itens atrasados e o atraso médio, analisadas individualmente e por meio análise multicritério realizada com o auxílio de uma técnica chamada TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*). Essa técnica tem a finalidade de encontrar e ranquear soluções com base em valores normalizados e ponderados dos critérios. Nesse caso, o tempo médio de fluxo recebeu o peso 0,5, enquanto os demais critérios receberam peso 0,25.

O Quadro 25 retrata esse período, no tangente à primeira parte desse tipo de método pertencente à quinta década escrutinizada.

QUADRO 25 – AUTORES QUE UTILIZARAM O MÉTODO HEURÍSTICO NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE I) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Adibi et al. (2010)	78
Li et al. (2010)	98
Nazarathy; Weiss (2010)	6
Parthanadee; Buddhakulsomsiri (2010)	24
Sha; Lin (2010)	62

QUADRO 25 – AUTORES QUE UTILIZARAM MÉTODOS HEURÍSTICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE I) (CONCLUSÃO)

Xing et al. (2010)	148
Yazdani et al. (2010)	116
Zandieh; Adibi (2010)	30
Agnetis et al. (2011)	25
Chan et al. (2011)	18
Cheng et al. (2011)	14
Gutiérrez; García-Magariño (2011)	22
Mati et al. (2011)	33
Moslehi; Mahnam (2011)	142
Sels et al. (2011)	18
Vinod; Sridharan (2011)	55
Xing et al. (2011)	20
Yusof et al. (2011)	21
Chen et al. (2012)	36
Georgiadis; Michaloudis (2012)	26
Goren et al. (2012)	6
Horng et al. (2012)	34
Horng; Lin (2012)	6
Li et al. (2012)	43
Shen; Buscher (2012)	29
Zhang et al. (2012)	35
Zhang; Wu (2012)	21

FONTE: O Autor (2017).

6.8.5.2 Método heurístico – Parte II

Em relação esse tipo de procedimento resolutivo, dos 42 artigos pertencentes à parte II do Quinto Período, no que concerne ao estudo dessa métrica, 23 deles utilizam em algum momento heurísticas. Esse número é ligeiramente menor do que o verificado na década anterior quando 27 das 41 publicações concernentes à parte I utilizaram tal classe de método resolutivo.

Dos artigos a essa parte restritos, se pode citar, no que diz respeito ao uso do tipo de método objeto de estudo dessa subseção o artigo de Lobo et al. (2013), que contempla um *Job Shop* estocástico e com dupla restrição de recursos (máquina e

operador). Nesse trabalho, há o estudo detalhado de três tipos de heurísticas designadas à minimização do *lateness* máximo.

Além disso, os autores estimam uma distribuição de probabilidade a fim de avaliar a qualidade (proximidade com a solução ótima) de uma alocação fornecida por um procedimento heurístico como os nesse estudo utilizados. Esta distribuição permite avaliar o nível de confiança do usuário que uma dada alocação possibilita à heurística gerar a melhor programação possível, isto é, aquela que minimiza ao máximo o *lateness* máximo alcançável.

O Quadro 26 apresenta as publicações que utilizaram o método heurístico no segundo excerto do Quinto Período.

QUADRO 26 – AUTORES QUE UTILIZARAM MÉTODOS HEURÍSTICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE II) (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Bülbül; Kaminsky (2013)	8
Chen; Matis (2013)	16
Chiang; Lin (2013)	38
Lobo et al. (2013)	3
Mencía et al. (2013)	5
Nie et al. (2013)	6
Qiu; Lau (2013)	11
Rojas-Santiago et al. (2013)	1
Wang et al. (2013)	13
Xiong et al. (2013)	42
Yuan; Xu (2013a)	21
Yuan; Xu (2013b)	26
Jia; Hu (2014)	18
Li et al. (2014)	36
Rossi (2014)	15
Spanos et al. (2014)	7
Zeng et al. (2014)	1
Abdeljaouad et al. (2015)	1
Birgin et al. (2015)	4
Gao et al. (2015)	7
González et al. (2015)	0
Murovec (2015)	1

QUADRO 26 – AUTORES QUE UTILIZARAM MÉTODOS HEURÍSTICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE II) (CONCLUSÃO)

Palacios et al. (2015)	11
------------------------	----

FONTE: O Autor (2017).

6.8.5.3 Método híbrido

No que tange às hibridações, esta apresentaram um crescimento se comparado ao verificado na década passada. Dos 83 artigos do Quinto Período, em 38 deles existe em algum momento da análise pelos autores realizada algum tipo de combinação de métodos resolutivos.

Dentre os artigos pertencentes a esse estrato, se pode citar dois estudos: o de Lobo et al. (2013) e o de Palacios et al. (2015). O primeiro combina as heurísticas citadas na subseção anterior, formando um método heurístico mais completo para tratar das características que o seu problema exhibe. Estas também foram citadas na subseção predecessora a esta.

No segundo, tem-se a combinação de duas meta-heurísticas na resolução de um *Job Shop* flexível e estocástico, com tempos de processamento difusos e tempos de preparação. A fim de avaliar o desempenho da hibridação proposta, os autores apresentam um extenso estudo computacional em um conjunto de 205 instâncias, considerando tanto instâncias difusas como determinísticas. Os resultados apresentados atestaram a competitividade do algoritmo proposto face àqueles que considerados como o estado-da-arte, para os dois tipos de instâncias, posto que este procedimento forneceu novos melhores resultados encontrados em 50 dessas instâncias.

O Quadro 27 apresenta os artigos que fizeram uso de hibridações no Quinto Período.

QUADRO 27 – AUTORES QUE UTILIZARAM HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (CONTINUA)

Autor	Número de Citações
Adibi et al. (2010)	78
De Giovanni; Pezzella (2010)	117
Li et al. (2010)	98

QUADRO 27 – AUTORES QUE UTILIZARAM HIBRIDAÇÕES NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (CONCLUSÃO)

Xing et al. (2010)	148
Zandieh; Adibi (2010)	30
Al-Hinai; ElMekkawy (2011)	66
Cheng et al. (2011)	14
Liu et al. (2011)	29
Sels et al. (2011)	18
Xing et al. (2011)	20
Yusof et al. (2011)	21
Chen et al. (2012)	36
Horng; Lin (2012)	6
Karimi et al. (2012)	20
Li et al. (2012)	43
Zhang, Q. et al. (2012)	46
Zhang, R. et al. (2012)	35
Zhang; Wu (2012)	21
Cheng et al. (2013)	1
Li; Pan (2013)	13
Lobo et al. (2013)	3
Nie et al. (2013)	6
Qing-dao-er-ji et al. (2013)	17
Yuan; Xu (2013a)	21
Yuan; Xu (2013b)	26
Yuan et al. (2013)	38
Zhang et al. (2013)	39
Jia; Hu (2014)	18
Rossi (2014)	15
Spanos et al. (2014)	7
Abdeljaouad et al. (2015)	1
Abdelmaguid (2015)	3
González et al. (2015)	0
Kaplanoğlu (2015)	8
Lin (2015)	12
Palacios et al. (2015)	11
Peng et al. (2015)	21
Zhang et al. (2015)	1

FONTE: O Autor (2017).

6.8.5.4 Outros métodos

No tangente a essa última ramificação do Quinto Período, tem-se os demais tipos de métodos resolutivos pelos autores empregados. Nesse período, tem-se como destaque a elevada utilização de métodos meta-heurísticos, a razoável aplicação de metodologia exata e a parca quantidade de simulações aqui encontradas.

Em relação ao emprego de métodos meta-heurísticos, se pode destacar o artigo de Kammer et al. (2011), que identifica e explora a questão dos pontos comuns (*commonalities*), que são características as soluções próximas a ótima tem em comum. A ideia básica aqui é determinar e comparar um grande número de boas soluções. Um elemento que ocorre nas soluções alta qualidade é, provavelmente, um bom elemento. A fase de indentificação desses pontos em comum é utiizada para melhorar a meta-heurística que os autores empregam em seu processo resolutivo, posto que a segunda implementação da meta-heurística utiliza informação da fase de identificação, a fim de favorecer soluções que contenham essas *commonalities*.

No que diz respeito ao uso de metodologia exata, se pode mencionar o artigo de Ebadi e Moslehi (2013), que utiliza esse tipo de método na resolução de um problema preemptivo de *Job Shop*, característica inusual dentre aquelas estudadas correlatas a esse ambiente fabril.

No que tange às simulações, se pode citar dentre os oito que aqui estão categorizados, o trabalho de Horng e Lin (2012) utilizam simulações em que se varia o número de replicações utilizada. O objetivo do estudo é otimizar a soma esperada, posto que o modelo tratado é estocástico, dos custos de estocagem e penalidades por atraso.

A Figura 61 traz a rede representativa dessa década no que tange aos tipos de métodos resolutivos distintos do heurístico e do híbrido.

FONTE: O Autor (2016).

Em suma, o que se verifica no que concerne a essa métrica é a prevalência do método heurístico face aos demais tipos. As causas para tal utilização são as mesmas que foram expostas no capítulo anterior, majoritariamente correlatas à facilidade de implementação e os tempos computacionais menores se comparado àqueles verificados em métodos exatos.

No entanto, nota-se o crescimento de métodos meta-heurísticos e, ou, híbridos, que resolvem problemas complexos com tempo computacional razoavelmente baixo e apresentam resultados melhores do que aqueles obtidos por heurísticas, que na maioria das vezes são aquelas clássicas de sequenciamento. Tais procedimentos, em sua maioria, utilizam instâncias clássicas da literatura quando da avaliação do seu desempenho algorítmico, tanto no que diz respeito à otimização de determinado critério, ou múltiplos critérios, quanto ao tempo despendido no processo resolutivo.

Além disso, diferentemente do que é verificado no estudo de *Flow Shop*, há a presença em todas as décadas estudadas de trabalhos que fazem uso da simulação. Em grande parte desses experimentos, estuda-se o comportamento de regras heurísticas de sequenciamento. Apesar disso, a importância desse tipo de método repousa na construção de cenários em que são testadas diversas componentes presentes na prática, como incerteza quanto aos tempos de processamento, diferentes níveis de estreiteza das datas de entrega, utilização das máquinas, níveis de prioridade dos itens, entre outros.

6.9 MÉTODOS RESOLUTIVOS

Assim como no capítulo anterior, a representação em redes dessa métrica difere das demais. Ao invés de se apresentar os autores, retrata-se o tipo de método e os métodos resolutivos propriamente ditos.

6.9.1 Primeiro Período (1960 – 1979)

Em relação a esse período tem-se um grande número de heurísticas, sendo a maioria delas as regras de prioridade clássicas do sequenciamento. No que tange aos demais tipos de métodos, destaca-se a hibridação de métodos proposta por Lageweg et al. (1977).

No que concerne às heurísticas, são abordadas nos trabalhos dessa década muitas clássicas da literatura, como a MTP, a MDE, a regra da menor folga, a Maior Quantidade de Trabalho Restante (MWKR – *Most Work Remaining*), entre outras. Cabe destacar aqui algumas heurísticas que diferem destas, como a SimSet (*Similar Setup*), proposta em Wilbrecht e Prescott (1969). Segundo essa regra, os itens que tem o menor tempo de preparação devem ter prioridade no sequenciamento. Como o artigo contempla a temática dos *setups*, as regras de prioridade nele descritas diferenciam o tempo de processamento do item do tempo do processo como um todo. Nesse tocante, há quatro regras de prioridade apresentadas a saber, *Shortest Run*, *Shortest Process*, *Longest Run* e *Longest Process*, que fazem essa distinção. *Run* refere-se ao tempo de processamento do item enquanto *Process* refere-se ao tempo de processamento mais o tempo de preparação daquele item.

O artigo de Lageweg et al. (1977) traz um *Branch and Bound* com algoritmos utilizados na fase de ramificação deste. Primeiramente, define-se um limite inferior (*lower bound*), que fornecido pelo valor de uma programação em um das máquinas que minimize o *makespan* e que atenda aos seguintes critérios: cada operação que deve ser realizada em uma máquina específica (M_k) deve estar disponível no menor instante de início possível; deve ser processada durante todo seu tempo de processamento, sem que haja interrupção; deve ser concluída em um tempo depois de deixar M_k ; e respeitar as restrições de precedência.

Os algoritmos implementados pelos autores combinam a definição do limite inferior com estratégias de ramificação. Em relação a estas últimas, tem-se duas abordadas no artigo. A primeira delas é chamada de Geração de Programações Ativas (GAS – *Generating Active Schedules*). Nesse algoritmo, gera-se programações ativas do seguinte modo: Seja S o conjunto de operações O_u cujos predecessores já tenham sido sequenciados; inicialmente, tem-se $S = \{O_{N_{i-1}+1} \mid i=1, \dots, n\}$. Seja t_u o menor instante de início de $O_u \in S$ e seja M_k uma máquina onde o mínimo menor tempo de conclusão possível $t(S) = \min \{t_u + p_u \mid O_u \in S\}$. Depois se considera sucessivamente todas as operações no conjunto $Q = \{O_u \mid O_u \in S \cap M_k, t_u < t(S)\}$ para ser programadas na próxima posição de M_k , definindo $r_u := t_u$ e atualizando S de acordo com:

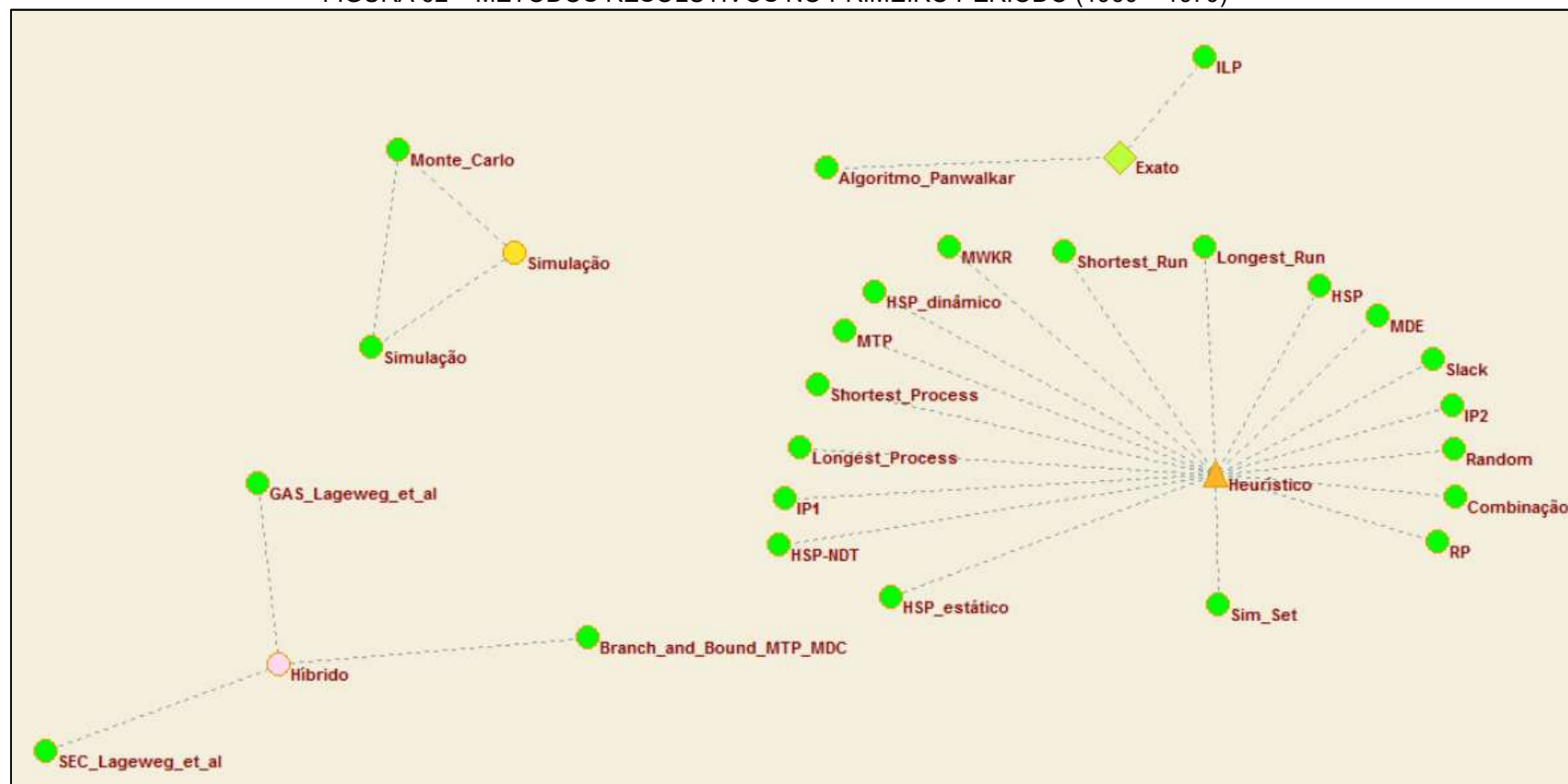
$$\left\{ \begin{array}{l} S := (S - \{O_u\}) \cup \{O_{u+1}\}, \text{ se } u < N_{i_u} \\ S := S - \{O_u\} \quad \quad \quad , \text{ se } u = N_{i_u} \end{array} \right\}.$$

Esse método gera cada programação ativa exatamente uma única vez.

O outro método de ramificação é a Solução de Conflitos essenciais (SEC – *Settling Essential Conflicts*). Esse segundo método se inicia a partir da escolha de um par de ramificação $\{u, v\}$ com $\{(u, v), (v, u)\}$ está contido no conjunto dos arcos disjuntos (aqueles em que a sequência das operações é definida) não resolvidos (*settled*). A partir daí particiona-se o subconjunto D de arcos em em dois descendentes disjuntos correspondentes a $D_{uv} = D \cup \{(u, v)\}$ e $D_{vu} = D \cup \{(v, u)\}$, respectivamente.

Os algoritmos formados (GAS e SEC) são aplicados em instâncias de até 6 itens e 6 máquinas, visando à minimização do *makespan*. A Figura 62 traz os métodos resolutivos empregados pelos autores no Primeiro Período.

FIGURA 62 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)



FONTE: O Autor (2016).

6.9.2 Segundo Período (1980 – 1989)

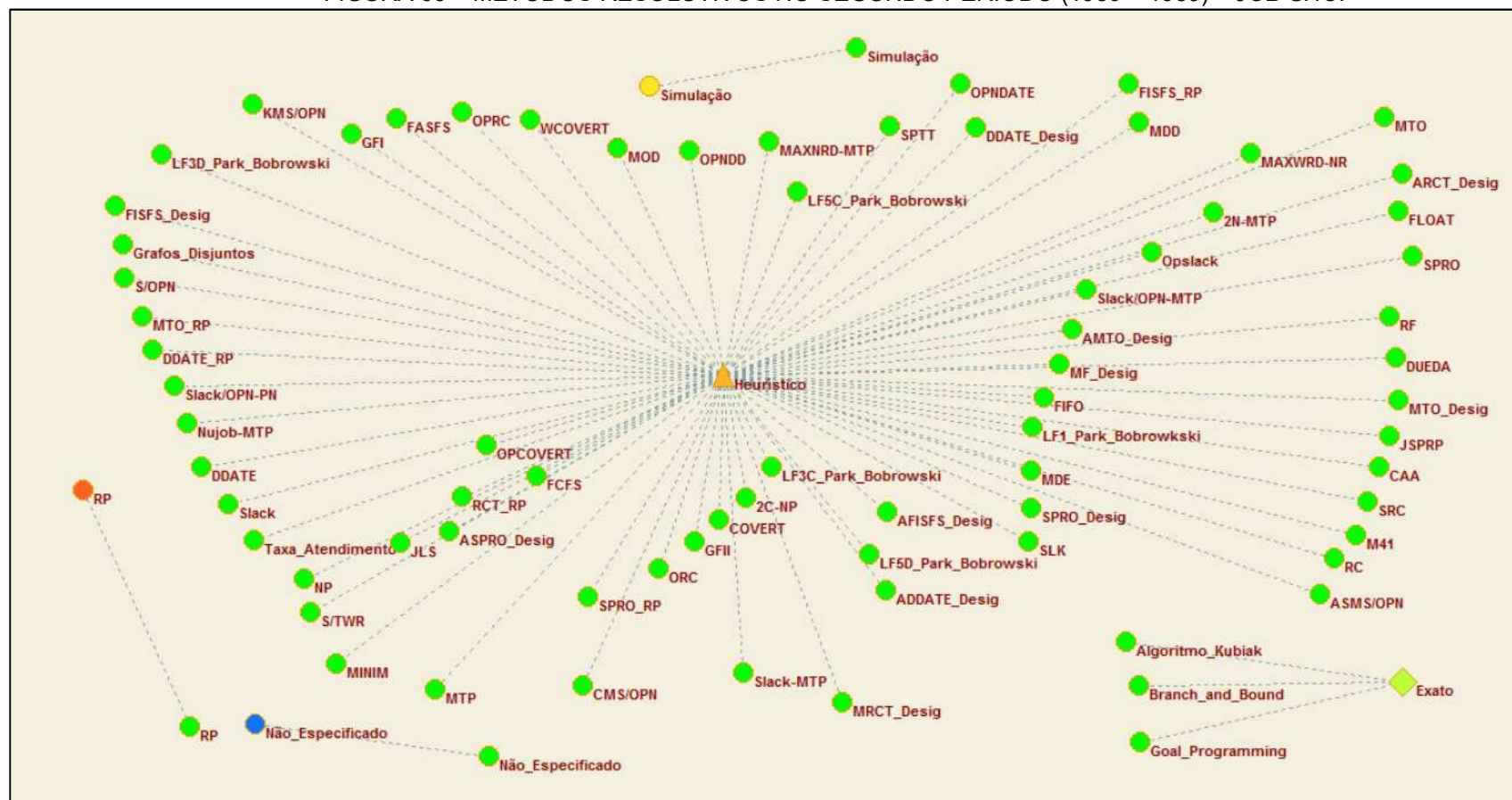
Concernente a esse período, tem-se um aumento de metodologias de resolução dos problemas de *Job Shop*. Verifica-se a incontestável predominância das heurísticas face aos demais tipos de métodos resolutivos. Estas heurísticas aparecem tanto na forma de métodos autorais, como na de regras de prioridade e heurísticas de sequenciamento clássicas.

O artigo de Philipoom et al. (1989) é um bom exemplo de estudo que trabalha com diversas heurísticas. Nesse artigo, os autores tratam de 14 heurísticas, quais sejam: MDE; A menor folga (*Slack*), dada pela diferença entre a data de entrega, o tempo em que a expedição ocorre e o tempo de processamento restante do item; menor folga por operação restante (S/OPN – *Smallest Slack per Remaining Operation*), dada pela razão entre a folga e o número de operações restantes do item; menor folga por tempo total restante (S/TWR – *Smallest Slack per Total Work Remaining*), dada pela razão entre a folga e o tempo de processamento restante do item; regra de folga de Jones-Lamson (JLS – *Jones-Lamson Slack Rule*), definida com a razão entre a folga e o produto entre o tempo de processamento restante e um fator de permissividade (*allowance*); razão entre a folga dos itens (JSR – *Job Slack Ratio*), definida como a razão entre a folga e a diferença entre a data de entrega e a expedição deste; folga modificada por operação restante de Carrol (CMS/OPN – *Carrol's Modified Slack Rule per Remaining Operation*), que é uma regra apresentada no trabalho de Carrol (1965), em que se a folga é maior que 0, deve-se usar a S/OPN. Caso contrário, utilizar EDD; folga modificada por operação restante de Adam e Surkis (ASMS/OPN – *Adam and Surkis' Modified Slack Rule per Remaining Operation*), desenvolvida por Adam e Surkis (1980), que exprime que se o conjunto de itens com folga de itens com folga negativa é vazio, deve-se usar S/OPN. Caso contrário, deve-se empregar a razão entre o módulo da folga e a quantidade de operações restantes; folga modificada por operação restante de Kanet (KMS/OPN – *Kanet's Modified Slack Rule*), apresentada em Kanet (1984), define que se um item tem folga positiva, a sua prioridade é determinada por S/OPN. Caso contrário, a prioridade é calculada pela diferença entre a data de entrega, o instante em que a expedição ocorre e o produto entre o número de operações restantes e o tempo de processamento restante; razão

crítica (CR – *Critical Ratio*), definida como o quociente da diferença da data de entrega e o instante de expedição, pelo produto entre o tempo de processamento e restante e a constante de permissividade; razão de fila (QR – *Queue Ratio*), dada pela razão entre a folga pela diferença entre a data de entrega e a data de liberação do item à linha; Método 41 (M41), definido como a razão entre QR e CR; e o maior custo por tempo de processamento (COVERT – *Largest Cost Over Processing Time*), definido como o quociente entre o custo do item e o tempo de processamento restante deste; e data de entrega modificada (MDD – *Modified Due Date*), definida como o valor máximo entre a data de entrega do item e a soma do tempo de expedição e o tempo de processamento restante.

Sobre a COVERT, deve-se detalhar os valores que o custo pode assumir. O custo é igual a 1 quando o instante de expedição é maior ou igual a diferença entre data de entrega e o tempo de processamento restante; é igual entre a razão da diferença entre o instante de expedição e o tempo de início planejado do item, pela diferença entre a data de entrega, o tempo de processamento restante e o instante de início planejado, caso o instante de expedição esteja no intervalo limitado inferiormente pelo instante de início planejado e superiormente pela diferença entre a data de entrega e o tempo de processamento restante. E pode ser 0, caso o instante de expedição seja menor do que o instante de início planejado.

A Figura 63 retrata o Segundo Período à luz dos métodos resolutivos nele empregados.

FIGURA 63 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.9.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

Face ao número elevado de métodos resolutivos correlatos a esse estrato temporal, dividiu-se o período em três partes: as duas primeiras dedicadas à análise das heurísticas, cuja prevalência é significativa se comparada aos demais métodos resolutivos, restritos ao terceiro momento no que concerne ao escrutínio do presente período.

6.9.3.1 Heurísticas – Parte I

No que diz respeito a esse primeiro estrato, tem-se um grande número de métodos heurísticos e, tal qual apresentado na década anterior, verifica-se um grande número de regras clássicas de sequenciamento, adaptação dessas regras e heurísticas autorais. Como na década passada, destacou-se as regras clássicas e adaptações destas, dar-se-á prioridade aos métodos autorais.

O artigo de Kanet e Zhou (1993) trata de um método autoral chamado MEANP. Este método tem como propósito ser um instrumento de implementação das ideias básicas da Teoria da Decisão com o menor incremento de complexidade computacional possível. A Teoria da Decisão apregoa que a cada conjuntura deve-se definir estratégias alternativas de ação, avaliar as consequências de cada alternativa sob o prisma de um dado critério e escolher a melhor opção.

O estudo dos autores trabalha com a programação do tipo sem atraso (NDS – *Non-Delay Schedules*), isto é, nenhum recurso é deliberadamente mantido ocioso caso haja uma operação em espera. O ponto nevrálgico quando da aplicação da Teoria da Decisão nas regras de prioridade repousa na estimação do valor Z_j , que é o custo estimado da programação completa. Nesse tocante, há uma série de maneiras de se estimar esse valor. Uma delas é a proposta pelo autor, o MEANP.

Esta heurística funciona do seguinte modo: Em primeiro lugar, por simplicidade, os custos das operações que ainda não tenham chegado em t , que é o instante de expedição, são ignorados. Estima-se o instante de início e de conclusão do item j escolhido como $s_j = t$ e $C_j = t + p_j$, respectivamente. Então, dado que j

já foi escolhido, estima-se o instante de início s_i e o instante de término C_i de todas as $n-1$ operações restantes na fila a partir das expressões $s_i = C_j + \frac{P}{2}$ e $C_i = s_i + p_i$,

onde $P = \sum_{k=1, (k \neq j)}^n p_k$.

Comparou-se a abordagem proposta com diversas heurísticas clássicas, a saber, Primeiro a Chegar, Primeiro a Servir (FCFS – *First Come, First Serve*); MTP; Menor Data de Entrega da Operação (EODD – *Earliest Operation Due Date*); COVERT; Data de Entrega Modificada da Operação (MODD – *Modified Operation Due Date*); e Custo do Atraso Aparente (ATC – *Apparent Tardiness Cost*). Os critérios de otimalidade estudados foram o atraso médio e porcentagem de itens atrasados. Em ambos, os resultados obtidos pelo MEANP foram consistentemente melhores do que os demais métodos.

O Quadro 28 traz os autores e as heurísticas utilizadas na primeira parte do Terceiro Período.

QUADRO 28 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*
(PARTE I) (CONTINUA)

Autor	Método
Scudder et al. (1990)	CR; Value Added Ratio; Profit/OP; OPCR
Applegate; Cook (1991)	Shuffle de Applegate-Cook; Planos de corte
Wein; Ou (1991)	FCFS; SEPT; Método Browniano
Gravel et al. (1992)	CR; SPT; Caminho Mais Distante; Partição; C5 de Gravel et al.; C6 de Gravel et al.
Wein; Chevalier (1992)	Constante; Proporcional; OPEN; CL(N); EDD; SEPT; DYN; REG-CT; WBAL
Adam et al. (1993)	Constante DINÂMICA (DYN); TWK-DYN; CPPT-DYN; CPFT; Constante Estática (EST); TWK-EST; CPPT-EST; CPFT-EST; JDD; OPNDD; CPPT-ADJ
Amico; Trubian (1993)	BIDIR de Dell'Amico-Trubian
Brandimarte (1993)	SPT; LWKR; MWKR; EDD; ATC
Kanet; Zhou (1993)	MEANP de Kanet-Zhou; FCFS; SPT; EODD; COVERT; MODD; ATC
Melnik et al. (1994)	TWK; SPT; MinSlack

QUADRO 28 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*
(PARTE I) (CONCLUSÃO)

Abdallah (1995)	Shortest Operation; Longest Operation; Longest Remaining Time; Next Operation to Total Work Ratio; EDD; OpSlack; JobSlack; Razão JobSlack
Barnes; Chambers (1995)	SPT; LPT; LWKR; MWKR; MWKR – SPT Tiebraker; MOR; Razão JWKR-OPT
Dorndorf; Pesch (1995)	SOT; LOT; LRPT; SRPT; LORPT; FCFS; SPT; LPT; SPRO; LNRO; LOS; RANDOM; SB
Golenko-Ginzburg et al. (1995)	H1* de Golenko-Ginzburg et al.; H1** de Golenko-Ginzburg et al.; H2 de Golenko- Ginzburg et al.
Herrmann et al. (1995)	SPT; Min Setup; EDD; EDD-Match-Setup- Atraso; SPRO; MDD; LPT; EFT; FIFO; SPTF; EDD-Para Frente; SPT-Para Frente; Regra Para Trás
Jensen et al. (1995)	TWK; SPT; WSPT; WMOD; COVERT(CVT); WCVT; ATC; WATC
Kim; Bobrowski (1995)	IMM; MSL; BIL, FFL; CR-Item; SIMSET; CR; SPT
Low (1995)	Heurística de Low

FONTE: O Autor (2017).

6.9.3.2 Heurísticas – Parte II

Dentre as diversas heurísticas presentes nesse excerto da análise concernente ao *Job Shop*, destaca-se aqui aquelas presentes no trabalho de Luh et al. (1998), que utiliza três heurísticas, sendo uma a Relaxação Lagrangiana e as outras duas métodos autorais. Essas heurísticas são apresentadas no Quadro 29.

A Relaxação Lagrangiana substitui as duras restrições de acoplamento do problema, correlatas à capacidade das estações de trabalho e dos estoques intermediários, pelo pagamento de um certo “preço” (os multiplicadores de Lagrange) para o uso de uma máquina ou *buffer* em cada etapa da enumeração. O problema original é decomposto em subproblemas menores, que são mais fáceis de resolver se comparado ao problema original e as soluções podem ser obtidas com facilidade por

meio de Programação Dinâmica. Os multiplicadores são iterativamente ajustados baseado no grau de violação das restrições. Os subproblemas são então resolvidos novamente baseados no novo conjunto de multiplicadores. Em termos matemáticos, uma função dual é maximizada nesse processo de atualização dos multiplicadores e os valores desse dual são os limites inferiores do custo ótimo factível. A qualidade da programação factível pode ser avaliada quantitativamente ao se comparar o custo desta ao custo obtido do maior *lower bound* fornecido pelo dual.

As heurísticas autorais são utilizadas para que as soluções dos subproblemas obtidas a partir da Relaxação Lagrangiana formem, de fato, soluções factíveis para o problema original. A primeira delas (H1_Luh_et_al), cria uma lista de operações, ordenando-a de modo crescente no que tange aos instantes de início. As operações são sequenciadas nas máquinas designadas assim que estas ficam disponíveis. A segunda heurística (H2_Luh_et_al) é gulosa baseada na mudança incremental da soma quadrática dos atrasos e adiantamentos e determina quais operações devem começar naquele instante de tempo e quais devem ser postergadas.

QUADRO 29 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*
(PARTE II) (CONTINUA)

Lourenço (1995)	EDD Aleatória e Não Preemptiva; Algoritmo de Matsuo-Suh-Sullivan; LSLO; LSMC; LSRW; MWR; LPT; SS; RSBH; SB; RDR(MWR); RDR(LPT); NSBH; Shuffle de Lourenço
Sadeh et al. (1995)	DCE; LOFF; IBH; DFS; ORR; FSS
He et al. (1996)	EDD; MST; SRPT; MDD; MJT
Kubiak et al. (1996)	SPT; Algoritmo A de Kubiak et al.
Nowicki; Smutnicki (1996)	INSA de Nowicki-Smutnicki
Sadeh; Fox (1996)	DFS; ORR; FSS
Choi; Korkmaz (1997)	SDJSS; Z & E de Choi-Korkmaz; EST/SPT
Dauzère-Pérès; Paulli (1997)	Heurística de Designação de Dauzère-Pérès-Paulli; FIFO
Fang; Xi (1997)	EDD
Balas; Vazacopoulos (1998)	SB; MWKR
Cheng; Jiang (1998)	DTWK; DPPW; TWK; PPW; ALL+CR+SPT; FCFS; SPT; MOD; CR+SPT
Luh et al. (1998)	Relaxação Lagrangiana; H1 de Luh et al.; H2 de Luh et al.

QUADRO 29 – HEURÍSTICAS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*
(PARTE II) (CONCLUSÃO)

Wu et al. (1999)	ATC; PFSL
Holthaus (1999)	PT+WINQ; RR; SPT; (TP+WINQ)/TIS; PT+WINQ+SL; WINQ; PT/TIS; AT; AT-RPT; FIFO
Neumann; Schneider (1999)	SB; Giffler e Thompson; MEWR; SEPT; FCFS; RANDOM
Pinedo; Singer (1999)	SB-TWT; PTB
Sabuncuoglu; Bayiz (1999)	Beam Search; MWR; LPT; SPT; LWR; EDD; MOD; MD

FONTE: O Autor (2017).

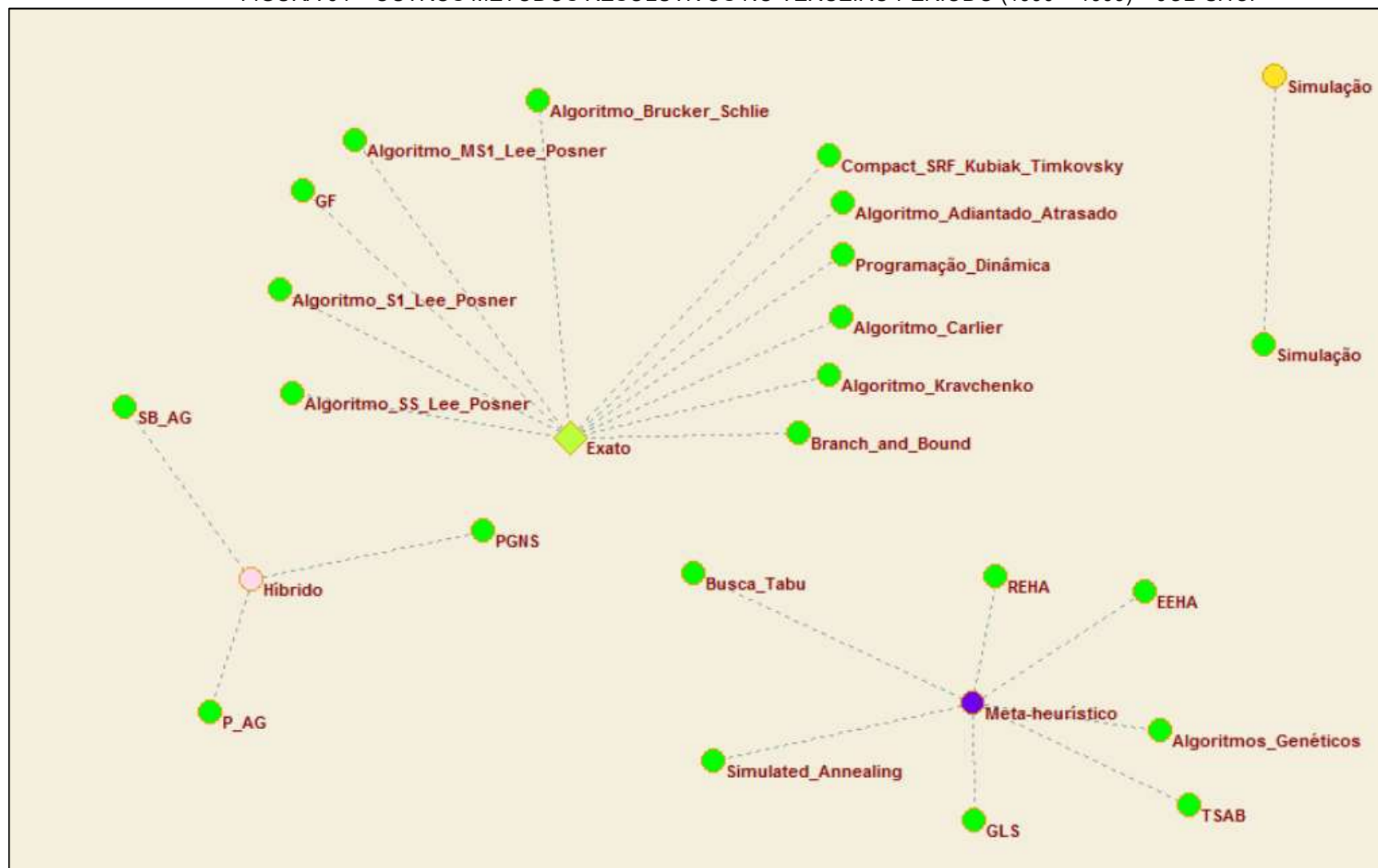
6.9.3.3 Outros métodos

No tangente aos métodos resolutivos diversos das heurísticas, destaca-se a utilização de métodos exatos e meta-heurísticos na solução dos modelos apresentados nos artigos correlatos a esta faixa temporal.

Dentre os métodos exatos, se pode citar o proposto por Kravchenko (1998), que é usado em um *Job Shop* sem espera, tempos de processamento unitários e com duas máquinas, a fim de minimizar o tempo médio de fluxo. Esse algoritmo trabalha com o conceito de programação de lista. Esta pode ser definida como se segue: Suponha que os itens estejam linearmente ordenados; Programe os itens em sequência. Feito isso para os primeiros k itens, programe o próximo item na sequência parcial de tal modo que este item seja concluído o mais cedo possível. Esse tipo de programação é chamado de programação de lista.

Em relação às meta-heurísticas, se pode citar o artigo de Dorndorf e Pesch (1995), que utiliza Algoritmos Genéticos em seu processo resolutivo. O artigo se destaca também por não apenas utilizar esta meta-heurística de maneira individualizada, mas também hibridizada com a heurística do Gargalo Flutuante (SB – *Shifting Bottleneck*), proposta por Adams et al. (1988), formando o algoritmo SB-GA e combinada com regras de prioridade clássicas formando o P-GA (*Priority rule based Genetic Algorithm*).

A Figura 64 traz a rede em que se apresentam os outros métodos resolutivos correlatos ao Terceiro Período.

FIGURA 64 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.9.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Este período foi fragmentado em quatro estratos, de modo a facilitar a visualização das redes, posto que dada à quantidade de entradas de métodos na rede (324), tornaria a representação de apenas uma rede inviável. Os dois primeiros estratos, são dedicados às heurísticas, responsáveis por 197 das 324 entradas. O terceiro é dedicado às meta-heurísticas, que contribuíram com 54 entradas. E, por fim, o último excerto é dedicado aos demais métodos aqui empregados.

6.9.4.1 Heurísticas – Parte I

Nessa primeira parte do Quarto Período persiste a utilização de regras de prioridade clássicas, assim como os métodos autorais, cuja utilização, em grande parte das vezes, é restrita exclusivamente àquele artigo ou aos artigos publicados por aquele mesmo autor. O Quadro 30 traz os métodos empregados nesse excerto.

Dentre os estudos que contemplam métodos autorais, destaca-se aquele proposto por Dai e Weiss (2002). O modelo utilizado pelos autores é um *Job Shop on-line*, estocástico e com considerações acerca dos estoques de segurança. O objetivo é a minimização do *makespan*.

O método apresentado pelos autores é intitulado heurística fluida. A heurística proucura manter o seu resultado próximo ao *lower bound* da máquina para o *makespan*. Para que isso ocorra, faz-se uma aproximação fluida do *Job Shop*. Para a aproximação considera-se que o trabalho é composto de fluido homogêneo ao invés de itens discretos com diferentes tempos de processamento e assume-se que o fluido fora do estoque intermediário (r, k) , que armazena o trabalho do passo (r, k) , pode escoar a uma taxa proporcional ao esforço da máquina $\sigma(r, k)$. Se o esforço total da máquina é dedicado ao *buffer* (r, k) , o fluxo estará na taxa máxima $1/\bar{m}_{(r,k)}$, onde $\bar{m}_{(r,k)}$ é o tempo médio de processamento no passo (r, k) entre todos os N_r itens. Pode-se fazer então a máquina i trabalhar a uma fração constante T_i/T^* de sua capacidade de processamento e dividi-la entre todos os *buffers* para que o fluido

decreça à mesma taxa em todos eles. A máquina gargalo ($\arg \max T_i$) trabalhará a plena capacidade, enquanto as outras trabalharão a uma fração de suas capacidades, acompanhando o ritmo do gargalo. À luz dessa política, a quantidade de trabalho restante cairá à taxa constante e todas as máquinas concluirão seu trabalho de maneira simultânea, em T^* , que é o *lower bound* para a máquina do *makespan*. Essa heurística tenta sequenciar os itens de modo a imitar a solução fluida. Por isso os autores a intitulam de heurística fluida. No entanto, os itens não são fluidos, mas discretos, com vários tempos de processamento e com a possibilidade que cada estação de trabalho de executar um item de cada vez e, portanto não é possível seguir a sequência fluida de modo preciso. Para que haja essa aproximação, usa-se estoques de segurança, cujo tamanho exato deve levar em consideração os valores de T_i / T^* , chamados de utilização da máquina, e a variabilidade do tempo de processamento. Na prática, a identificação do gargalo, a utilização das máquinas, e a variabilidade dos tempos de processamento são estimadas a partir de informações gerais sobre os tempos de processamento ao invés de valores exatos para estes. Assume-se o mesmo estoque de segurança para todos os *buffers*.

Após a determinação do gargalo e do tamanho dos estoques de segurança, o fator *on-line* da heurística e do modelo se dá porque não se usa os valores dos tempos de processamento para favorecer determinada permutação dos itens. Ao invés disso, fixa-se a ordem dos itens e a renumera, executando cada passo (r, k) para os N itens de N_r nessa ordem. Fixa-se também a ordem de passos $(r, k) \in C_i$ e deixa-se a máquina i por um ciclo destes passos nessa ordem. A qualquer instante, a heurística usa apenas a informação de quantos itens concluíram cada um dos passos, qual fase (*job step*) está em processo em cada máquina que está operando e quais máquinas estão ociosas. Quando este estado se altera, ou seja, quando se conclui um dos passos em alguma máquina, determina-se a partir dessa informação de estado das máquinas ociosas volta a operar. A ordem predeterminada dos itens e passos dita que itens e quais passos serão processados nesses inícios. Os tempos de processamento dos itens só é necessário quando da determinação dos instantes de conclusão destes, não sendo vital *à priori*.

QUADRO 30 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP*
(PARTE I) (CONTINUA)

Autor	Método
Litchfield; Narasimhan (2000)	SPT; SPT Modificado
Pezzella; Merelli (2000)	SB
Boudoukh et al. (2001)	CFA; GFA
Cheung; Zhou (2001)	SDJSS; SPTS; MWKR
Yang; Wang (2001)	Heurística 1 de Yang-Wang; Heurística 2 de Yang-Wang
Zhou et al. (2001)	SPT; MWKR; NST
Asano; Ohta (2002)	Algoritmo de Asano-Ohta
Dai; Weiss (2002)	Heurística Fluida de Dai-Weiss
Golenko-Ginzburg; Gonik (2002)	Heurística de Golenko-Ginzburg-Gonik
Mascis; Pacciarelli (2002)	AMCC; SMCP; SMBP; SMSP; SMCP-SMBP
Sabuncuoglu; Comlekci (2002)	FCFS; MOD; SPT; OBE; TWK; OFS; COFS
Bertsimas et al. (2003)	ASF-CE; MTT; LTT; SPT; LPT; SRPT; LRPT; LBFS; FBFS
Chen; Luh (2003)	Relaxação Lagrangiana; SSG; WSPT; Heurística de Lista; LW/SPT; LW/EDD; LW/CR; SQ/SPT; SQ/EDD; SQ/CR
Lengyel et al. (2003)	FF; MFF; EDD; TWK; Constante; LST; CR; MOD; ALL+CR+SPT; CR+SPT; S/RPT+SPT
Schuster; Framinan (2003)	SPT; LPT; SOT; LOT; SMT; LMT; RANDOM
Mattfeld; Bierwirth (2004)	FCFS determinístico; FCFS probabilístico (prob); SPT prob; S/OPN prob; COVERT prob
Meloni et al. (2004)	AMCC; SMSP; SMBP
Sung Lee et al. (2004)	Algoritmo de Inserção
Woeginger (2004)	Algoritmo APP de Woeginger
Alvarez-Valdes et al. (2005)	Algoritmo de Alvarez-Valdes et al.; SPT; MDD; ATC; S/TRP; CR+SPT; COVERT; RR; PT+WINQ+SL; AT-RPT
Cavory et al. (2005)	Algoritmo 2 de Cavory et al.
De Bontridder (2005)	Algoritmo de Inserção de Wennink; Algoritmo de Fluxo Máximo
Gonçalves et al. (2005)	Busca Local; Algoritmo de Construção de Programações Ativas e Parametrizadas
Hurink; Knust (2005)	Heurística de Brucker-Thiele

QUADRO 30 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP*
(PARTE I) (CONCLUSÃO)

Jansen et al. (2005)	Algoritmo P1 de Jansen et al.; Algoritmo P1' de Jansen et al.; Algoritmo P2 de Jansen et al.; Algoritmo P3 de Jansen et al.; Algoritmo P3' de Jansen et al;
Low et al. (2005)	Método de Critério Global
Tavakkoli-Moghaddam; Daneshmand-Mehr (2005)	FIFO; LIFO; LVF/PT; HVF/PT; HVF/10-Job Step/PT; LVF/10-Job Step/PT; HVF/10-Job Step; LVF/10-Job Step; HVF/10- Job Step/ (TNOW+PT); LVF/10-Job Step/ (TNOW+PT)
Zoghby et al. (2005)	Algoritmo de Ejeção da Cadeia de Factibilidade; Algoritmo de Níveis de Reentrada
Framinan; Schuster (2006)	CLM; CLM-time; SPT; LPT; RANDOM

FONTE: O Autor (2017).

6.9.4.2 Heurísticas – Parte II

Dentre os artigos que compõem esse segundo estrato da análise, destaca-se aquele de Wong et al. (2009) em que se trata a questão de um *Job Shop* com operações de montagem. Há um certo tipo de peça que é comum a mais de uma lista de materiais. A esse tipo de peça (*common part*), é construída uma heurística (Heurística da Peça em Comum) pelos autores para lidar com esse aspecto da solução do problema.

Uma vez que existem peças em comum, deve-se determinar quando e como compartilhar os itens de um mesmo padrão entre produtos distintos, permitindo que lotes e sublotos de listas de materiais distintas possam ser montados. A heurística é executada quando um item (item alvo) está em falta no estoque e o seu modelo é padrão. Então a heurística por outro item (item substituto) do mesmo modelo padrão, que deve obedecer a três pressupostos: que os itens alvo e substituto pertençam a listas de materiais distintas; que ambos sejam do mesmo modelo padrão; e que ao menos haja um item substituto em estoque. Se o item substituto falha, então outro item é escolhido que não haja itens disponíveis. Caso contrário, o substituto é comparado ao alvo no que tange ao *lateness*. No instante da comparação, o tempo de entrega do produto cujo item alvo é componente e o tempo de entrega do produto

cujo substituto é componente podem ser calculados. Até este ponto, há dois casos. O primeiro caso é quando não se espera atraso do produto substituto, então o item substituto é usado para repor o item alvo. O segundo caso é quando em ambos os produtos espera-se atraso, então compara-se o custo do *lateness*. Se este em relação ao produto alvo é maior do que o do produto substituto, o item deste repõe o item daquele. Caso contrário, nenhuma peça em comum é compartilhada e outro item é escolhido até que não haja itens disponíveis.

O Quadro 31 traz esse e os demais métodos correlatos ao segundo estrato do Quarto Período.

QUADRO 31 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP*
(PARTE II) (CONTINUA)

Autor	Método
Ohta; Nakatani (2006)	SB
Pathumnakul; Egbelu (2006)	Heurística de Pathumnakul-Egbelu; Método de Busca de Pathumnakul-Egbelu
Ren; Weng (2006)	SPT+Slack+SQNO; RQNO; TWK Generalizado; FCFS; COVERT; EDD; ATC; SPT
Sha; Hsu (2006)	Giffler e Thompson
Brucker; Kampmeyer (2007)	Heurística H1 de Brucker-Kampmeyer; Heurística H2 de Brucker-Kampmeyer
Heinonen; Pettersson (2007)	SPT; LPT; TLM; TLJ; TLM+TLJ
Ho et al. (2007)	SPT; LPT; FIFO
Petrovic et al. (2007)	Giffler e Thompson
Zhang et al. (2007)	Giffler e Thompson
Caumond et al. (2008)	Busca Local
Huang; Liao (2008)	TML; TR; MWR
Liaw (2008)	Heurística de Liaw
Pezzella et al. (2008)	RANDOM; MWR; AR1; AR2; MOR
Vinod; Sridharan (2008)	TWK; FIFO; SPT; EDD; EMDD; CR; SimSet; JCR; SSPT; JSPT; JEDD; JEMDD; JSSPT
Zhang et al. (2008)	Método Padrão de Subida
Abdelmaguid (2009)	Giffler e Thompson; MWR
Manikas; Chang (2009)	SPT; SSTPT; EDD; LWKR; MWKR; STR; CR; ATCS; FIFO
Penn; Raviv (2009)	FBDR

QUADRO 31 – HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP*
(PARTE II) (CONCLUSÃO)

Topaloglu; Kilincli (2009)	SBM; MSB-TML; MSB-TOTINF; Largest Number of Sucessors; LPT; LWKR; MWKR; SPT; Algoritmo SAL de Topaloglu-Kilincli
Wong et al. (2009)	Heurística de Peça Comum
Xing et al. (2009)	SPT; OAMK; OAPK; LPT; MWR; MOR
Zhou et al. (2009)	WCOVERT; WSPT; RM; EDD; TWK

FONTE: O Autor (2017).

6.9.4.3 Meta-heurísticas

Dentre as meta-heurísticas empregadas nesse período, destaca-se a utilização do Algoritmo Imune Multi-Modal (MMIA – *Multi-Modal Immune Algorithm*), utilizado para o *Job Shop* em Luh e Chueh (2009).

Esse algoritmo, assim como diversas meta-heurísticas é bio-inspirado, procurando mimetizar o funcionamento do sistema imunológico dos seres humanos. Análogo a este, o algoritmo proposto tem a capacidade de procurar a melhor solução e manter a diversidade do espaço de busca. No que tange ao *Job Shop*, o antígeno e os anticorpos são correspondentes à função objetivo, que no modelo tratado, minimiza o *makespan* e as sequências, respectivamente.

O método consiste em nove passos, que serão aqui sumarizados. Para maiores detalhes, ver Luh e Cheh (2009). O primeiro passo consiste na inicialização aleatória da população de anticorpos. Tem-se a representação do anticorpo baseada na operação (*operation-based*), em que se nomeia todas as operações de um mesmo item com o mesmo número e esta é interpretada de acordo com a ordem de ocorrência em um dado anticorpo.

O segundo passo é a classificação dos genes e o cálculo do *makespan*. Os genes são classificados em dois grupos: genes de cadeia pesada e genes de cadeia leve. O terceiro passo é o cálculo da afinidade entre anticorpo e antígeno. Aqui ilustra-se a intensidade combinatorial entre antígeno/função objetivo e anticorpo/sequência. O quarto passo é proliferação de clones do do anticorpo mais correspondido. Nesse passo, o anticorpo com maior valor de afinidade é escolhido para a hipermutação, após o processo de proliferação dos clones.

O quinto passo é a seleção dos anticorpos doadores. Nesse momento, emulando a construção das bibliotecas de DNA da linha germinativa no sistema imunológico biológico, os autores utilizam o método de seleção por torneio (*tournament selection*) para escolher anticorpos doadores com o maior valor de afinidade. O sexto passo é a construção das bibliotecas de DNA da linha germinativa. Aqui, o material genético usado na produção de moléculas de anticorpo é armazenado nessas bibliotecas, cada uma contendo um fragmento do gene do anticorpo. No método, os anticorpos de memória e os anticorpos doadores constroem essas bibliotecas.

O sétimo passo é a reorganização dos fragmentos dos genes. No sistema imune natural, os anticorpos são produzidos por meio de uma recombinação aleatória dos fragmentos de genes de uma biblioteca de DNA da linha germinativa. No método, isto se dá criação de novos anticorpos/sequências via reorganização dos fragmentos de genes. Primeiramente, escolhe-se aleatoriamente um anticorpo da biblioteca de genes como semente. Então seus genes/itens localizados em determinados loci são substituídos por genes associados ao anticorpo doador aleatoriamente selecionado da biblioteca. Depois, outro anticorpo doador é selecionado e seus genes/itens pertencentes a outra estação de trabalho substituem os componentes correspondentes do novo anticorpo semente gerado. Processos similares são repetidos até que os genes/itens de todas as máquinas sejam reorganizados. Esse procedimento tem por finalidade a geração de programações factíveis.

O oitavo passo é a diversificação dos anticorpos. No método, seis esquemas de diversificação foram usados, com efeito de exploração nos processos de busca de otimização. O nono e último passo é o critério de parada, definido quando a geração chega a determinado número pré-definido. Caso contrário, retorna-se ao passo 2. No estágio final as melhores e mais diversificadas soluções são armazenadas na memória.

Os autores realizaram testes computacionais em duas instâncias de Fisher e Thompson (1963) e 17 de Lawrence (1984) e em 17 desses testes chegou-se à melhor solução conhecida.

O Quadro 32 apresenta as meta-heurísticas utilizadas no Quarto Período.

QUADRO 32 – META-HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP*
(CONTINUA)

Autor	Método
Pezzella; Merelli (2000)	Busca Tabu
Cheung; Zhou (2001)	AG
Wang; Zheng (2001)	AG; SA
Yang; Wang (2001)	CSANN
Zhou et al. (2001)	AG
Esquivel et al. (2002)	MSE; SGA
Steinhöfel et al. (2002)	SA
Tarantilis; Kiranoudis (2002)	List Based Threshold Accepting
Yoshitomi (2002)	GAUCE de Yoshitomi; AG
Kis (2003)	AG; Busca Tabu; RND de Kis
Schuster; Framinan (2003)	VNS
Yoshitomi; Yamaguchi (2003)	GAUCE; AG
Mattfeld; Bierwirth (2004)	AG
Meloni et al. (2004)	Rollout Method de Meloni et al.
Sung Lee et al. (2004)	List Based Threshold Accepting
Cavory et al. (2005)	AG
De Bontridder (2005)	Busca Tabu
Hurink; Knust (2005)	Busca Tabu
Nowicki; Smutnicki (2005)	i-TSAB
Zhou et al. (2005)	Algoritmo Imune
Framinan; Schuster (2006)	Algoritmo de Combined Timetabling
Lian et al. (2006)	SPSOA; AG
Brucker; Kampmeyer (2007)	Busca Tabu
El-Bouri et al. (2007)	SA
Heinonen; Pettersson (2007)	ACO
Ho et al. (2007)	GENACE; LEGA; Algoritmo Evolucionário
Petrovic et al. (2007)	MOGA
Tsai et al. (2007)	Algoritmo Imune
Zhang et al. (2007)	EDTS
Caumond et al. (2008)	Algoritmo Mimético
Huang; Liao (2008)	Busca Tabu
Huang; Yang (2008)	ACO
Liaw (2008)	Busca Tabu
Pezzella et al. (2008)	AG
Zhang et al. (2008)	AG
Fattahi et al. (2009)	Busca Tabu

QUADRO 32 – META-HEURÍSTICAS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (CONCLUSÃO)

Luh; Chueh (2009)	MMIA
Manikas; Chang (2009)	AG
Wang et al. (2009)	3DGA
Wong et al. (2009)	AG; PSO; LS
Xing et al. (2009)	ACO; Regra de Seleção Sintética
Zhou et al. (2009)	AG

FONTE: O Autor (2017).

6.9.4.4 Outros métodos

Em relação aos demais métodos resolutivos, tem-se a predominância das hibridações e dos métodos exatos nesse período.

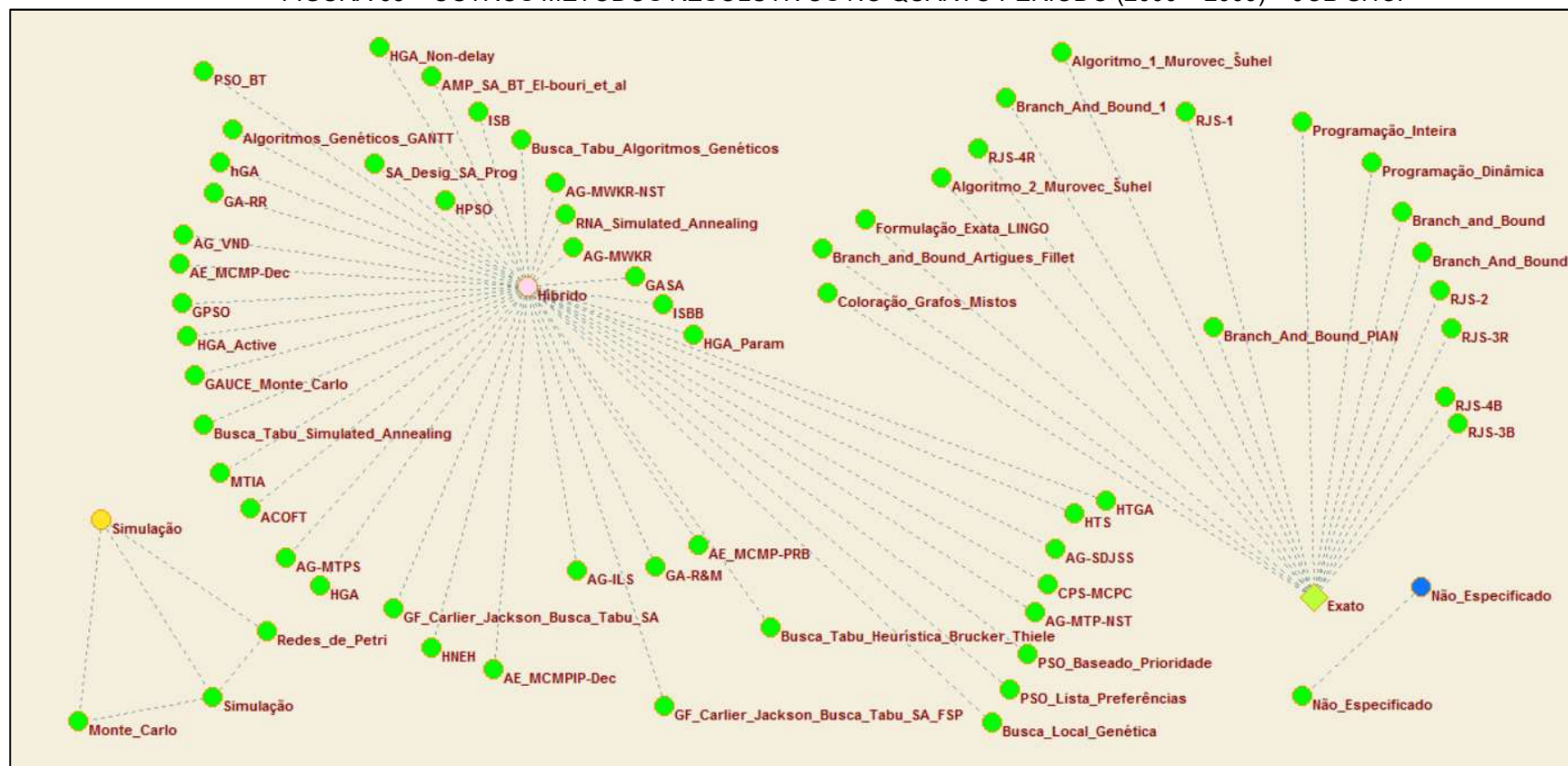
Em relação a primeira, destaca-se o artigo de Tavakkoli-Moghaddam et al. (2005) que combina uma rede neural artificial a um *Simulated Annealing* na resolução de um *Job Shop* estocástico, com o objetivo de minimizar a soma da variação entre o tempo de processamento real e o tempo planejado, os custos operacionais e os custos da ociosidade para cada máquina no horizonte de planejamento. Em relação ao método propriamente dito, tem-se três fases: alocar máquinas a tarefas aleatoriamente em relação à flexibilidade da máquina em processar diferentes produtos; gerar uma solução inicial ou factível por meio da rede neural; e melhorar a qualidade e desempenho dessa solução inicial por meio do *Simulated Annealing*.

No que concerne aos métodos exatos, se pode citar o artigo de Al-Anzi et al. (2006) que utiliza o *Branch and Bound* e a Coloração de Grafos Mistos (*Mixed Graph Coloring*) na resolução de um *Job Shop* com tempos de processamento unitários das operações, recirculação, e visando à minimização do tempo de conclusão total.

Destaca-se nesse trabalho a utilização inédita do método de Coloração de Grafos Mistos. Os subgrafos desse grafo misto sem arestas representam a união dos caminhos e subgrafos sem arcos representam união de cliques. O clique é um subconjunto de vértices em um grafo não direcionado, tal que seu subgrafo induzido é completo. Trata-se portanto de um conjunto máximo de vértices mutuamente adjacentes (GUTIN, 2003). Encontrar a coloração ótima de um grafo misto com o

critério de minimizar a soma das cores máximas (usada para os caminhos) é análogo à determinação da minimização do tempo total de conclusão em um *Job Shop*.

A Figura 65 retrata esse período no que tange aos métodos resolutivos diversos das heurísticas e meta-heurísticas.

FIGURA 65 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.9.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Nesse período registra-se a maior quantidade de entradas de métodos em qualquer período, com 332. Destas, 208 são heurísticas. Portanto, segmentou-se esse último estrato temporal em cinco segmentos: os três primeiros dedicados às heurísticas; o quarto dedicado às hibridações, que ultrapassaram as meta-heurísticas no tangente à frequência superior que aquelas tem se comparado a estas; e o quinto dedicado aos demais métodos resolutivos.

6.9.5.1 Heurísticas – Parte I

Dentre as heurísticas restritas a esse primeiro estrato, apresentados no Quadro 33 destaca-se aquela proposta em Mati et al. (2011). Neste artigo se utiliza uma abordagem geral destinada à otimização de qualquer critério regular de *Job Shop*. Essa abordagem é um método de busca local que usa o conceito de grafos disjuntos e a geração de vizinhanças por meio da troca de arcos críticos. Os experimentos são realizados em diversos critérios (*makespan*, tempo ponderado total de fluxo, atraso ponderado total, soma ponderada de itens atrasados, atraso máximo).

Tal método é intitulado heurística MDL. Primeiramente, uma solução inicial factível é calculada. Isso ocorre a partir da fixação das disjunções uma após a outra por meio da seleção da máquina que executa a operação com o menor tempo de conclusão. Dentre todas as operações na fila daquela máquina, a que apresenta o menor aumento do critério é a primeira a ser sequenciada.

A partir disso, o método, que consiste em três fases, de fato é executado. A primeira fase (fase de melhoria) é um método em descida que busca iterativamente por um ótimo local ao visitar soluções que são geradas pela troca de arcos no caminho crítico dos itens que contribuem àquele critério. A segunda etapa (fase intermediária) é um método em descida que inicia a partir da solução da fase 1 mas usa um critério auxiliar (soma do *lateness*) para se selecionar a melhor troca na vizinhança. A terceira fase (fase mista) é a etapa de diversificação e aqui aceita-se tanto movimentos bons quanto ruins, a fim de escapar de um ótimo local.

QUADRO 33 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE I)

Autor	Método
Adibi et al. (2010)	MWKR; SPT; FIFO; LIFO; EDD
Li et al. (2010)	OPT; GPT; MWR; MOR; SPT; RANDOM
Nazarathy; Weiss (2010)	Política On-Line de Rastreamento Fluido de Nazarathy-Weiss
Parthanadee; Buddhakulsomsiri (2010)	FCFS; SPT; LPT; EDD; MinSlack1; MinSlack2; LPT-SPT; MDD; CT
Sha; Lin (2010)	Giffler e Thompson
Xing et al. (2010)	OAPK; OAMK
Yazdani et al. (2010)	AR1 de Yazdani et al.; AR2 de Yazdani et al.; Se1 de Yazdani et al.; Se2 de Yazdani et al.; As de Yazdani et al.; Regra Combinada de Yazdani et al.; I1 de Yazdani et al.; I2 de Yazdani et al.
Zandieh; Adibi (2010)	SPT; LIFO; FIFO
Agnetis et al. (2011)	Heurística de Blocos de Agnetis et al.
Chan et al. (2011)	Algoritmo de Separação de Itens; FCFS; LCFS; SPT; RANDOM
Cheng et al. (2011)	FIFO; LRPT; ATC; CR; SB-TML
Gutiérrez; García-Magariño (2011)	Heurísticas de Reparo
Mati et al. (2011)	Heurística MDL de Mati et al.
Moslehi; Mahnam (2011)	Busca Local
Sels et al. (2011)	Algoritmo de Inserção Aleatória
Vinod; Sridharan (2011)	DPPW; TWK; DTWK; RWK; FIFO; SPT; EMODD; CRSPT; SLRPT; PTWINQ; PTWINQSL
Xing et al. (2011)	OAMK; OAPK
Yusof et al. (2011)	SPT; LPT; MWR; LWR; RANDOM
Chen et al. (2012)	EDD; SPT; LPT
Georgiadis; Michaloudis (2012)	SPT

FONTE: O Autor (2017).

6.9.5.2 Heurísticas – Parte II

No que concerne aos artigos desse segundo estrato, destaca-se aquele de Chen e Matis (2013), em que se propõe a implementação de uma heurística de

sequenciamento flexível, a fim de minimizar o atraso em um *Job Shop* estocástico, com datas de liberação e recirculação.

Tal método é intitulado WBMR (*Weighted Biased Modified RRrule*), considerado uma extensão da regra de Raghu e Rajendran (1993), para problemas ponderados. Esta heurística proposta pelos autores procura balancear as regras Folga por Tempo de Processamento Restante (SPTR – *Slack per Remaining Processing Time*) e MTP baseadas na utilização do sistema, posto que a primeira é adequada à sistemas com alto nível de congestionamento, enquanto a última fornece melhores resultados em ambientes com baixos níveis de congestionamento.

O WBMR define uma função multiplicativa de ponderação tendenciosa (*bias*) que posiciona a prioridade produzida pela combinação linear de SPTR e MTP para cima ou para baixo baseado no peso que é dado ao item. Sob o ponto de vista da aplicabilidade, este método é aconselhável quando há diferentes graus de importância e, ou urgência dos itens, a fim de se cumprir os prazo prometidos ao cliente, especialmente os que tem maior relevância para a empresa.

O Quadro 34 traz a segunda parte das heurísticas do Quinto Período.

QUADRO 34 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE II) (CONTINUA)

Autor	Método
Goren et al. (2012)	SB; SVPT; LEPT; SEPT; CV; MEWKR; MEWKR-P; MEWKR/P; LEWKR; LEWKR-P; MOPNR; LOPNR; RANDOM
Horng et al. (2012)	CR; SPT; EDD; LPT; FCFS;
Horng; Lin (2012)	EDD; FCFS; EDD; SPT; LPT; CR
Li et al. (2012)	MWKR; MOPNR; R1 de Li et al.; R2 de Li et al.
Shen; Buscher (2012)	MJ/SPT
Zhang et al. (2012)	RANDOM; Slack; Busca Local
Zhang; Wu (2012)	RPS-SPT; LWKR; LOR; NINQ; EDD; Slack; Slack Modificada
Bülbül; Kaminsky (2013)	SB-TPD
Chen; Matis (2013)	WBMR; FIFO; S/RPT; WSPT; WATC

QUADRO 34 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE II) (CONCLUSÃO)

Chiang; Lin (2013)	Giffler e Thompson; Global Minimal Workload; RANDOM; Local Minimal Workload; Minimal Processing Time; MWKR; MOPNR;
Lobo et al. (2013)	LNSS; QSS1; QSS2
Mencía et al. (2013)	Heurística IS de Mencía et al.
Nie et al. (2013)	RP
Qiu; Lau (2013)	RP
Rojas-Santiago et al. (2013)	Modified Delay; First Fit; Modified First Fit Decreasing; MWKR; MOPNR
Wang et al. (2013)	EF; LPC; SW; SR; CSR; EFS; LR; LRA; SRA; SPT; LPT; OPT; SR
Xiong et al. (2013)	AR1 de Xiong et al.; AR2 de Xiong et al.; LPT; MOR; MWR; Seleção Randômica; OAMK; OAPK

FONTE: O Autor (2017).

6.9.5.3 Heurísticas – Parte III

No que diz respeito a este estrato, destaca-se a aplicação da heurística NEH, tão comum em problemas de *Flow Shop*, mas pela primeira vez encontrada nos artigos analisados, em problemas de *Job Shop*.

Esta heurística é utilizada em Abdeljoud et al. (2015), em um *Job Shop* com ponderações acerca dos fluxos reversos. Este trabalho aborda uma configuração fabril em que a extensão das operações de desmontagem dos produtos é exatamente oposta àquela da montagem e os produtos de ambos os fluxos utilizam as mesmas máquinas.

Como os fluxos são os mesmos, mas em direções opostas, os autores dividem o problema em dois problemas de *Flow Shop* e resolvem esses problemas com o auxílio da NEH, que foi explicada capítulo anterior da presente dissertação.

O Quadro 35 retrata a ampla gama de heurísticas utilizadas no terceiro segmento dedicado ao estudo das heurísticas no Quinto Período.

QUADRO 35 – HEURÍSTICAS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE III)

Autor	Método
Yuan; Xu (2013a)	LNS; Heurística de Janela de Tempo; Busca Local; LPV; Harmony Search
Yuan; Xu (2013b)	Busca Local; LPV
Jia; Hu (2014)	SPT; LPT; MOR; RANDOM; Global Minimal Time
Li et al. (2014)	OPT; LPT; RANDOM; MWR; MOR; SPT
Rossi (2014)	Heurística de Lista; EST; EST Dinâmica
Spanos et al. (2014)	Giffler e Thompson; SPT; LPT; LOR; MOR; TWR; RANDOM; FCFS
Zeng et al. (2014)	Algoritmo 1 de Zeng et al.; Heurística TS-HEU de Zeng et al.; Algoritmo 2 de Zeng et al.
Abdeljaouad et al. (2015)	NEH
Birgin et al. (2015)	Heurística de Lista; Beam Search
Gao et al. (2015)	MA1 de Gao et al.; MA2 de Gao et al.; MA3 de Gao et al.; MA4 de Gao et al.; MA5 de Gao et al.; OS1 de Gao et al.; OS2 de Gao et al.; EH1 de Gao et al.; EH2 de Gao et al.; EH3 de Gao et al.; EH4 de Gao et al.; MA2-RANDOM de Gao et al.; MA2+OS1 de Gao et al.; MA2+OS2 de Gao et al.
González et al. (2015)	Algoritmo 1 de González et al.; Algoritmo 2 de González et al.; Algoritmo 3 de González et al.
Murovec (2015)	Algoritmo de Murovec
Palacios et al. (2015)	Heurística de Inserção

FONTE: O Autor (2017).

6.9.5.4 Métodos híbridos

Dentre as diversas hibridações apresentadas nesse quinto período, destaca-se a apresentada em Palacios et al. (2015). Neste artigo, os autores hibridizam um Algoritmo Genético com uma Busca Tabu, intitulando o algoritmo proposto de HGTS (*Hybrid Genetic Tabu Search*).

O modelo resolvido pelos autores é um *Job Shop* flexível, estocástico e com tempos de processamento difusos, visando à minimização do *makespan*. Os passos principais desta hibridação são os seguintes. No primeiro passo, a população inicial é gerada por uma heurística de inserção para o problema em questão, com as características difusas e flexíveis acima mencionadas. A saída dessa fase é a ordem de processamento das operações e a alocação das operações às máquinas, o que define a programação.

No segundo passo o Algoritmo Genético é iterado em um número de gerações. Em cada geração, uma nova geração é obtida a partir da prévia por meio da aplicação dos operadores genéticos comuns. A próxima fase consiste na aplicação da Busca Tabu em todas as sequências produzidas seja pela heurística de inserção seja pelo AG. O cromossomo correspondente é reconstruído a partir da sequência melhorada via Busca Tabu para que estas características que melhoram a solução seja transferida às proles (*offspring*) subsequente, efeito conhecido como evolução Lamarquiana.

O Quadro 36 expõe as hibridações realizadas no Quinto Período.

QUADRO 36 – MÉTODOS HÍBRIDOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (CONTINUA)

Autor	Método
Adibi et al. (2010)	VNS-RNA
De Giovanni; Pezzella (2010)	AG-Busca Local
Li et al. (2010)	HTSA
Xing et al. (2010)	KBACO
Zandieh; Adibi (2010)	VNS-RNA
Al-Hinai; ElMekkawy (2011)	HGA
Cheng et al. (2011)	Algoritmo Mimético Híbrido de 2 Estágios
Liu et al. (2011)	AAGA
Sels et al. (2011)	HGA; HSS
Xing et al. (2011)	MPICA
Yusof et al. (2011)	PGA de Yusof et al.
Chen et al. (2012)	GGA
Horng; Lin (2012)	AG-RNA
Karimi et al. (2012)	KBVNS; KBACO; LEGA; VNGA
Li et al. (2012)	HSFLA
Zhang, Q. et al. (2012)	GATS

QUADRO 36 – MÉTODOS HÍBRIDOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (CONCLUSÃO)

Zhang, R. et al. (2012)	PSO-Busca Local; PSO-Monte Carlo-AOOC
Zhang; Wu (2012)	SA-Máquina Gargalo; AG-Codificação Híbrida
Cheng et al. (2013)	AEH de Cheng et al.; TSSA; HGA
Li; Pan (2013)	HCRO
Lobo et al. (2013)	HSP
Nie et al. (2013)	GEPRSC
Qing-dao-er-ji et al. (2013)	AG-Busca Local
Yuan; Xu (2013a)	Hybrid Harmony Search
Yuan; Xu (2013b)	Evolução Diferencial Híbrida N1; Evolução Diferencial Híbrida N2
Yuan et al. (2013)	Hybrid Harmony Search
Zhang et al. (2013)	Algoritmo de Colônia de Abelhas Híbrido
Jia; Hu (2014)	PRMOTS; PRMOTS with Intensification Search
Rossi (2014)	RR-ACS
Spanos et al. (2014)	pGA Híbrido
Abdeljaouad et al. (2015)	NEH-Math Opt
Abdelmaguid (2015)	HC-RGNS
González et al. (2015)	Scatter Search-Path Relinking
Kaplanoğlu (2015)	SA com Abordagem Orientada a Objeto
Lin (2015)	HBBO
Palacios et al. (2015)	HGTS
Peng et al. (2015)	BT/PR
Zhang et al. (2015)	GATS

FONTE: O Autor (2017).

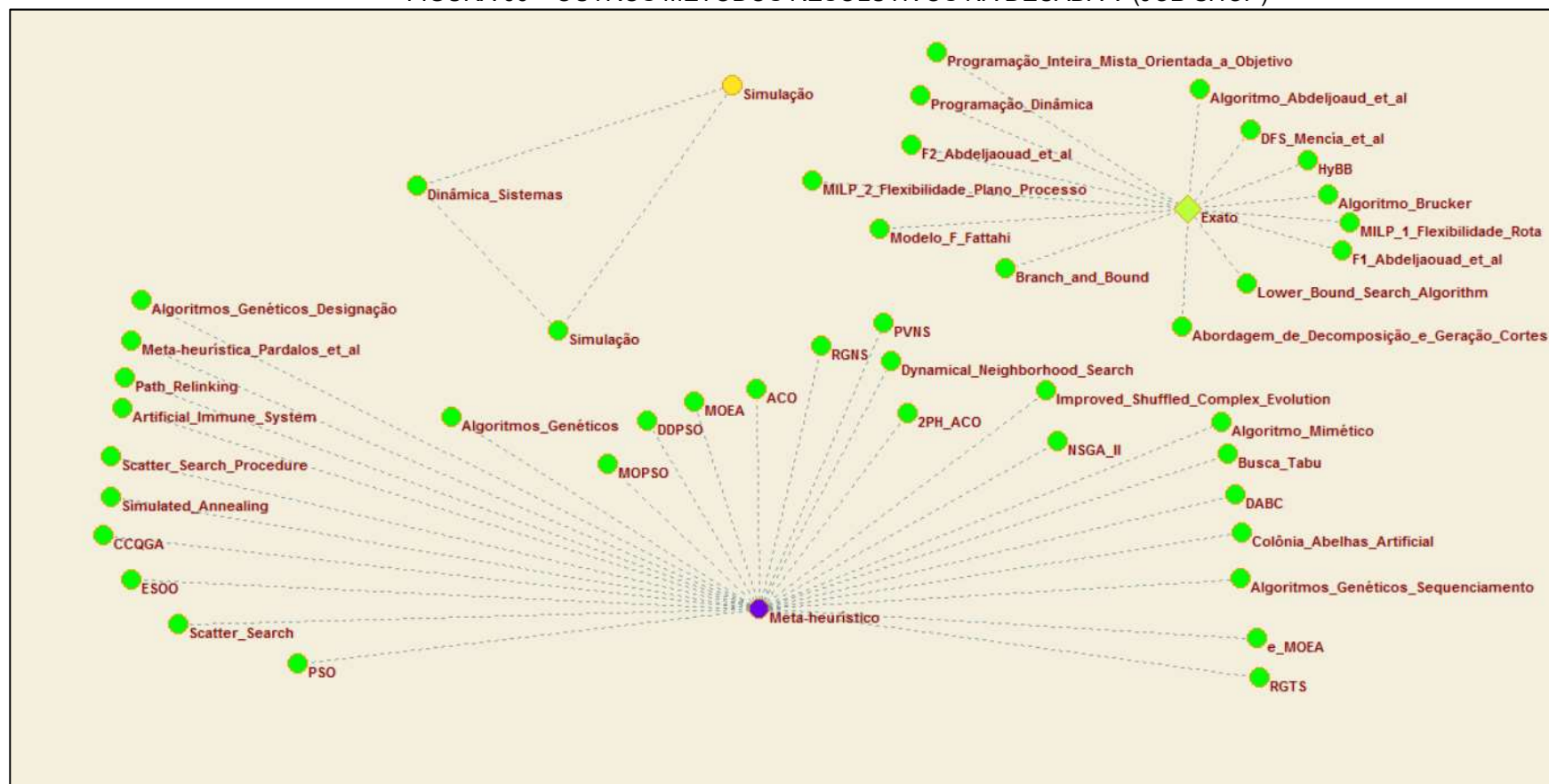
6.9.5.5 Outros métodos

No tangente aos demais métodos, tem-se a predominância das meta-heurísticas. Destas, se pode citar a Abordagem de Colônia de Formigas com Dois Feromônios (2PH-ACO – *Two Pheromone Ant Colony Optimization*), proposta em Huang et al. (2013).

Este artigo trata de um *Job Shop* flexível com janelas de entrega e tempos de preparação dependentes da sequência, visando à minimização da soma ponderada de atrasos e avanços.

O método proposto pelos autores é muito similar ao ACO clássico. A diferença se dá pela adição do segundo gupo de feromônios, destinado à solução da fase do sequenciamento de modo mais rápido. Outros pontos distintos do que é comumente verificado quando da implementação clássica desta meta-heurística é a regra de transição de estado para a atualização do feromônio. Esta regra assemelha-se àquela encontrada no ACO original. Outro ponto distinto é que o segundo feromônio utiliza a regra de atualização global de feromônio em cada nó. O propósito da atualização global do feromônio a cada iteração é estressar a melhor rota e aumentar a probabilidade que um nó seja selecionado enquanto se persegue adequadamente a solução ótima e a atualização global do feromônio converge o algoritmo por meio do aumento de feromônios na nos nós pertencentes à melhor rota.

A Figura 66 traz o panorama dos métodos resolutivos distintos das heurísticas e métodos híbridos dessa última fragmentação do Quinto Período.

FIGURA 66 – OUTROS MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA V (*JOB SHOP*)

FONTE: O Autor (2016).

Em síntese, finda a análise dessa métrica, verifica-se, assim como na lógica produtiva abordada no capítulo anterior a predominância das heurísticas face aos demais tipos de métodos resolutivos. Além disso, são características marcantes desses procedimentos encontrados com maior frequência a utilização de heurísticas clássicas de sequenciamento, das regras de prioridade mais antigas às adaptações destas face a problemas que não eram abordados nas primícias do estudo de *Job Shop*, como os ambientes flexíveis, cada vez mais em voga nos artigos escrutinizados.

A outra característica notória desse procedimento é a frequência considerável de algoritmos autorais, que são restritos em grande parcela das ocasiões a apenas e tão somente ao trabalho em que tal metodologia fora proposta.

Em relação aos demais métodos, verifica-se um crescimento, especialmente a partir do Quarto Período do uso de meta-heurísticas e hibridações, que resolvem problemas complexos, como os verificados em instâncias da literatura consideradas difíceis em tempo computacional razoavelmente baixo e com respostas consistentemente mais satisfatórias do que as encontradas via métodos heurísticos.

6.10 PERIÓDICOS

No que diz respeito à análise dos periódicos, assim como no capítulo anterior, as redes mostrarão os autores e, por extensão, os artigos, simbolizados por quadrados amarelos e as publicações representadas por círculos na cor verde.

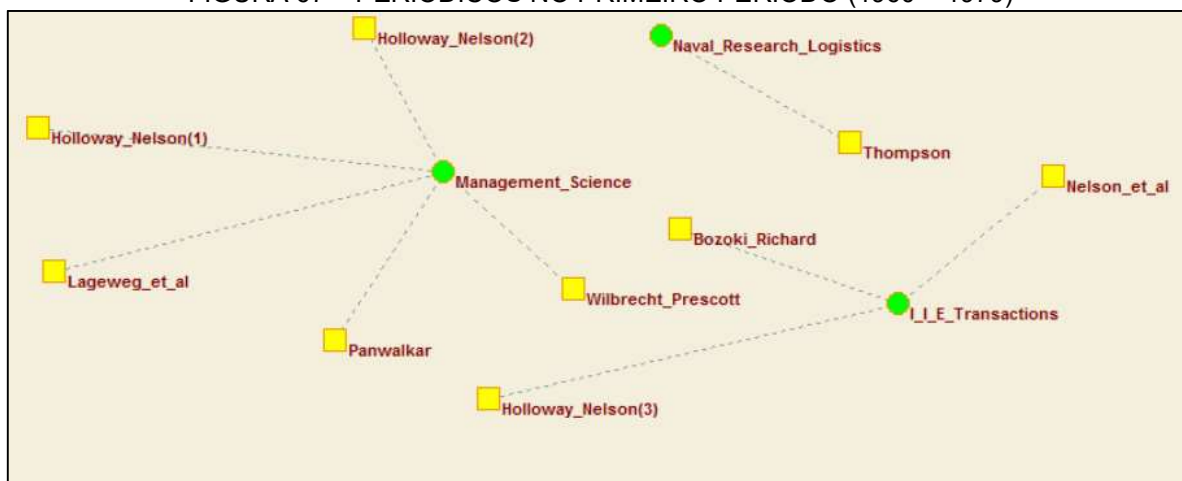
6.10.1 Primeiro Período (1960 – 1979)

Em relação a esse período, a pouca quantidade de artigos a ela restritos (9), também é distribuída por uma baixa quantidade de periódicos, apenas 4. Dentre estes, destaca-se a *Management Science*, que tem cinco dos nove artigos publicados.

No tangente aos autores, destaca-se Nelson, que foi autor ou co-autor de 4 dos 9 artigos a essa década restritos. O autor também se destaca por ter sido o único a publicar em dois periódicos distintos, a *Management Science* e a *IIE Transactions*. Os artigos escritos por ele tem um foco voltado à simulação de heurísticas clássicas,

proposta de heurísticas autorais e estudo de diversos critérios de otimalidade em um mesmo trabalho. A Figura 67 traz os artigos e os periódicos em que estes foram publicados, no que concerne à primeira década.

FIGURA 67 – PERIÓDICOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1960 – 1979)



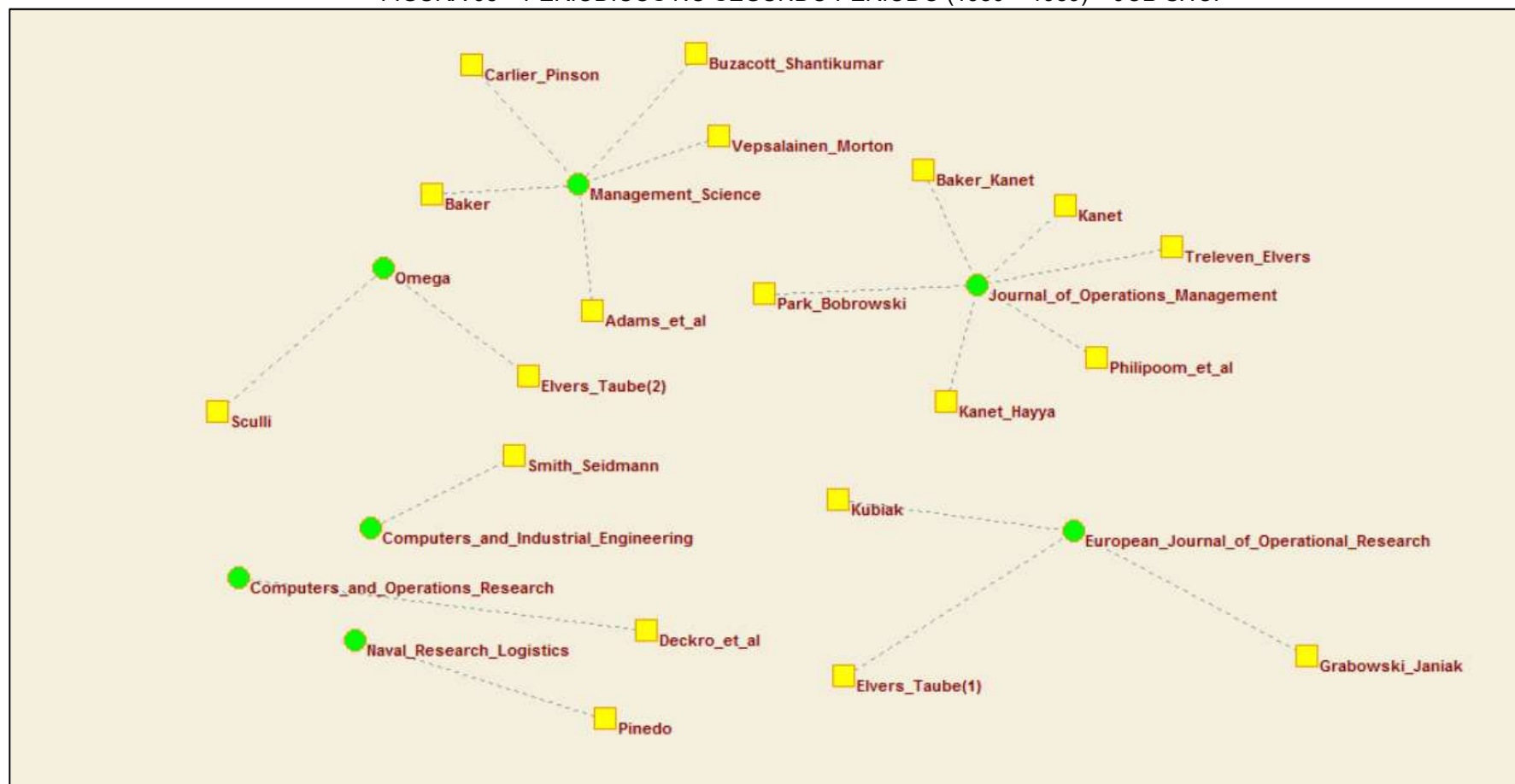
FONTE: O Autor (2016).

6.10.2 Segundo Período (1980 – 1989)

Nesse período tem-se o aumento do número de artigos e, por conseguinte, o número de periódicos. Dentre as novas publicações que tem estudos de *Job Shop* publicados, destaca-se a *Journal of Operations Management*, com 6 dos 19 artigos nela publicados, bem como a EJOR, com 3 trabalhos. Dentre aquelas que já figuravam na década passada, há que se destacar a *Management Science*, com 5 artigos.

Em relação aos autores, destacam-se Elvers e Kanet. Ambos foram autores ou co-autores em três artigos cada. No que diz respeito ao primeiro, este publicou em três periódicos distintos (EJOR, *Journal of Operations Management* e *Omega*) e seu trabalho é voltado à simulação do desempenho de diversas heurísticas de sequenciamento, face a um grande número de critérios de otimalidade.

Kanet também traz em seus estudos as mesmas características. No entanto, o seu trabalho foi publicado em apenas um periódico, a *Journal of Operatons Management*. A Figura 68 traz a rede que apresenta os periódicos desse estrato.

FIGURA 68 – PERIÓDICOS NO SEGUNDO PERÍODO (1980 – 1989) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.10.3 Terceiro Período (1990 – 1999)

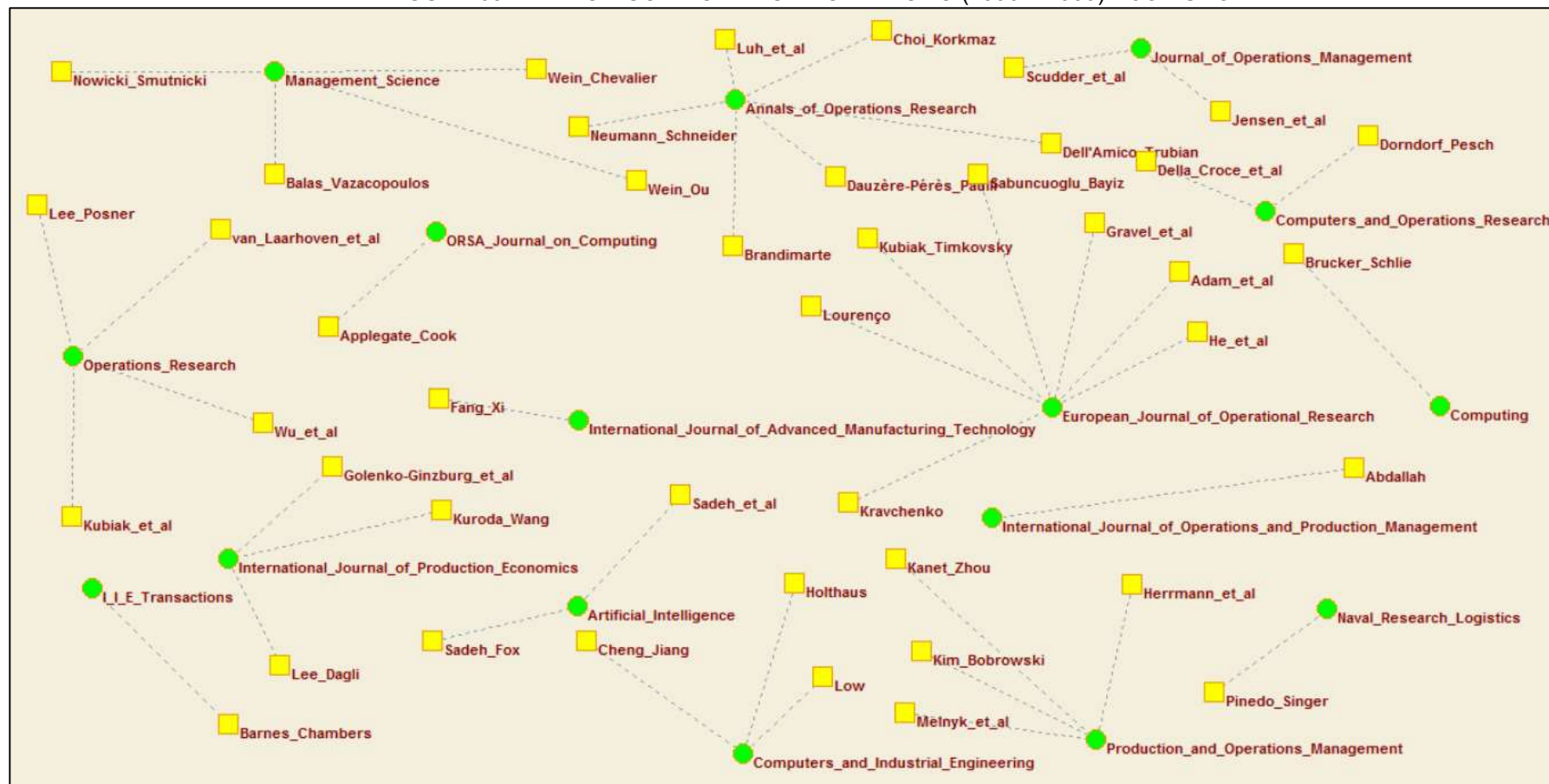
No que concerne a esse período, o número de artigos sofre um aumento considerável, se comparado ao período anterior. São 43 estudos aqui categorizados, publicados em 16 periódicos distintos. Dentre as novas publicações, destaca-se a *Annals of Operations Research*, com 6 artigos nela publicados.

Dentre os periódicos que já continham artigos pertencentes ao escopo da presente revisão em décadas anteriores, destaca-se a EJOR, com 7 estudos nesse importante periódico dentro da área da Pesquisa Operacional publicados.

Em relação aos autores, a década é marcada por pouca quantidade de autores que tem mais de uma publicação. São dois os autores que figuram nessa categoria, a saber, Kubiak e Wein, com dois artigos cada. Dentre esses, destaca-se Kubiak, que publicou seus estudos em mais de um periódico. O primeiro, ao lado de Lou e Wang na *Operations Research* e ao lado de Timkovsky na EJOR.

A linha de pesquisa de Kubiak apresenta como característica a preferência por metodologias exatas de resolução e com características diversas do modelo clássico, como recirculação, tempos de preparação e tempos de processamento unitários.

A Figura 69 traz os autores e periódicos do Terceiro Período.

FIGURA 69 – PERIÓDICOS NO TERCEIRO PERÍODO (1990 – 1999) – *JOB SHOP*

FONTE: O Autor (2016).

6.10.4 Quarto Período (2000 – 2009)

Face ao elevado número de publicações e periódicos correlatos a esse período, optou-se por segmentá-lo em duas partes: a primeira contém os primeiros 43 artigos, em ordem cronológica, concernentes a esse período. A segunda contém os 43 restantes.

6.10.4.1 Quarto Período – Parte I

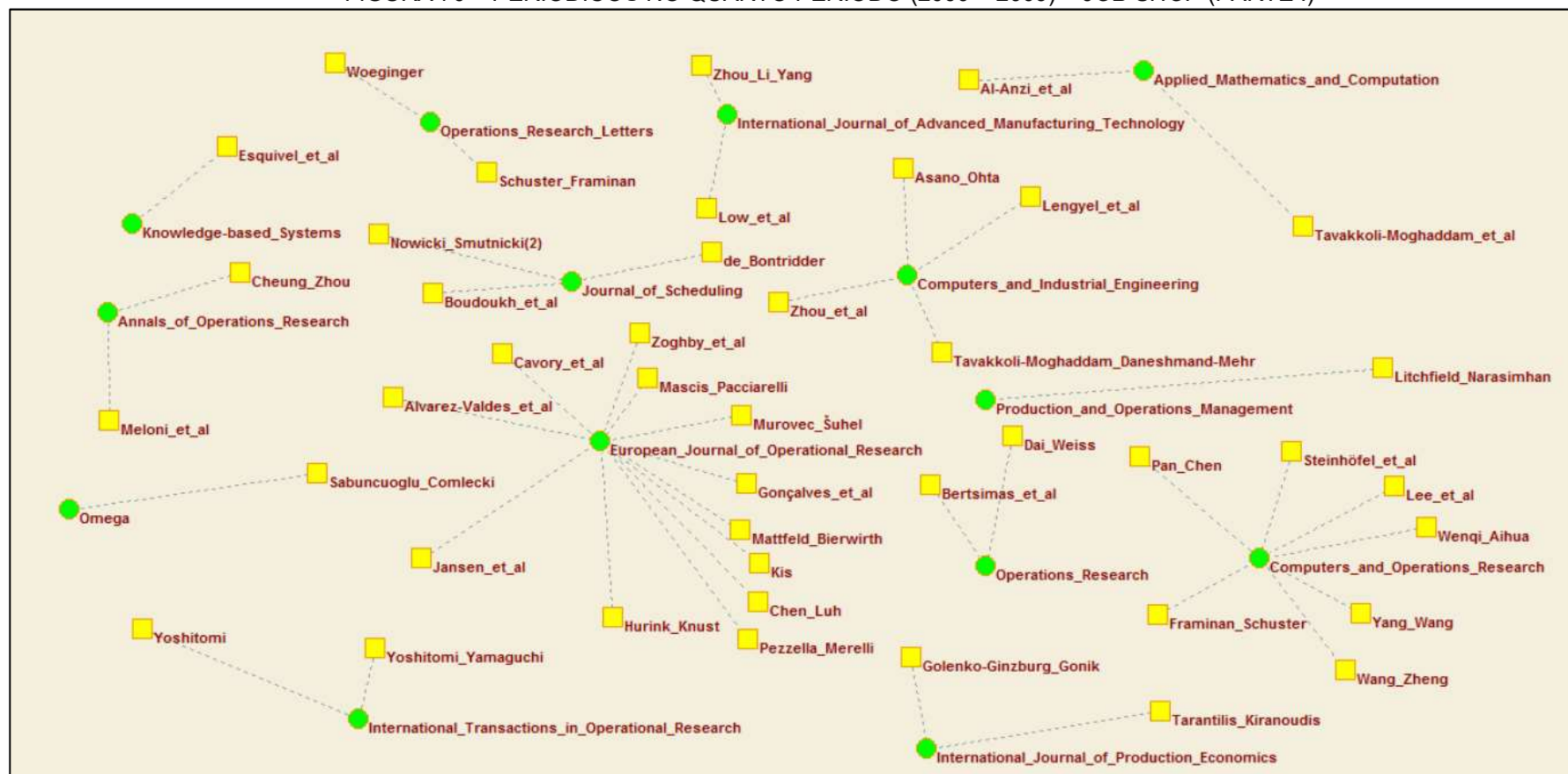
Em relação a esse estrato, destaca-se a predominância da EJOR face aos demais periódicos, com 13 dos 43 trabalhos correlatos a esse excerto nela publicados. Outro periódico que se destaca no tangente à quantidade de artigos publicados é a *Computers and Operations Research*, com 7 trabalhos. A Figura 70 traz a rede representativa desse período.

No que concerne aos autores, Framinan, Schuster, Zhou, Yoshitomi e Tavakkoli-Moghaddam publicaram dois artigos cada. Destes, apenas Yoshitomi não teve artigos em mais de um periódico.

Framinan e Schuster escreveram em conjunto os dois artigos aqui relacionados. Em ambos artigos, publicados na *Operations Research Letters* e *Computers and Operations Research*, os autores trataram de modelos *Job Shop* sem espera e visando à minimização do *makespan*.

No que diz respeito aos artigos em que Zhou é autor ou co-autor, publicados na *Annals of Operations Research* e na *Computers and Industrial Engineering*, tem-se em comum o método resolutivo empregado, que são os Algoritmos Genéticos, em sua forma pura ou hibridizada.

No tangente aos artigos em que Tavakkoli-Moghaddam é autor ou co-autor, publicados na *Applied Mathematics and Computation* e na *Computers and Industrial Engineering*, trabalha-se com temas distintos. No primeiro, ao lado de Daneshmand-Mehr, o autor versa sobre uma simulação com diversas heurísticas, enquanto no segundo, ao lado de Jolai, Vaziri, Ahmed e Azaron, usa um modelo híbrido de resolução, combinando as meta-heurísticas Redes Neurais e *Simulated Annealing*.

FIGURA 70 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – *JOB SHOP* (PARTE I)

FONTE: O Autor (2016).

6.10.4.2 Quarto Período – Parte II

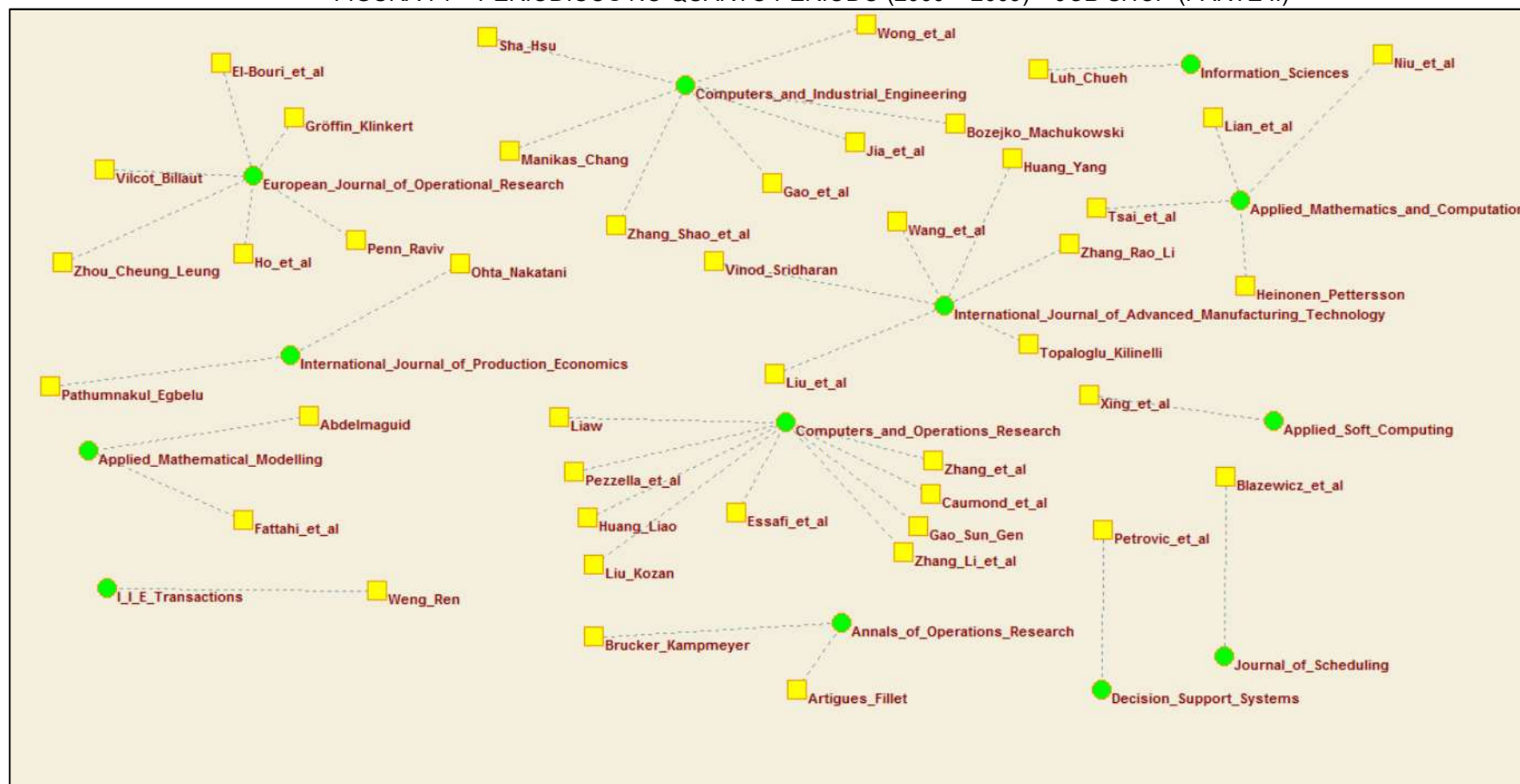
Nesse período, destaca-se no que tange à quantidade de artigos publicados, a *Computers & Operations Research*, com 9 dos 43 trabalhos nela inseridos. Nesse tocante, a se destacar a *Computers and Industrial Engineering*, com 7 estudos.

Dentre os autores, destaca-se Zhang, que ao lado de Rao e Li, escreveram de forma conjunta três artigos alusivos ao escopo da presente revisão e correlatos ao segundo excerto da quarta década. Estes autores publicaram seus estudos em dois periódicos, sendo dois na *Computers and Operations Research* e um na *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

Tem-se como característica marcante no trabalho dos autores a utilização da Busca Tabu, hibridizada ou não, para resolução de problemas com o objetivo de minimizar o *makespan*. Em todos os artigos escritos pelos autores, houve validação dos métodos resolutivos por meio da resolução de instâncias clássicas da literatura.

A Figura 71 traz a rede que aborda os autores e periódicos dessa segunda parte do Quarto Período.

FIGURA 71 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2000 – 2009) – JOB SHOP (PARTE II)



FONTE: O Autor (2016).

6.10.5 Quinto Período (2010 – 2015)

Assim como no período anterior, devido ao pronunciado número de artigos e periódicos, dividiu-se a análise dessa última década em dois momentos: no primeiro estão os primeiros 41 estudos, em ordem cronológica, correlatos a esse estrato, enquanto no segundo apresenta-se os 42 restantes.

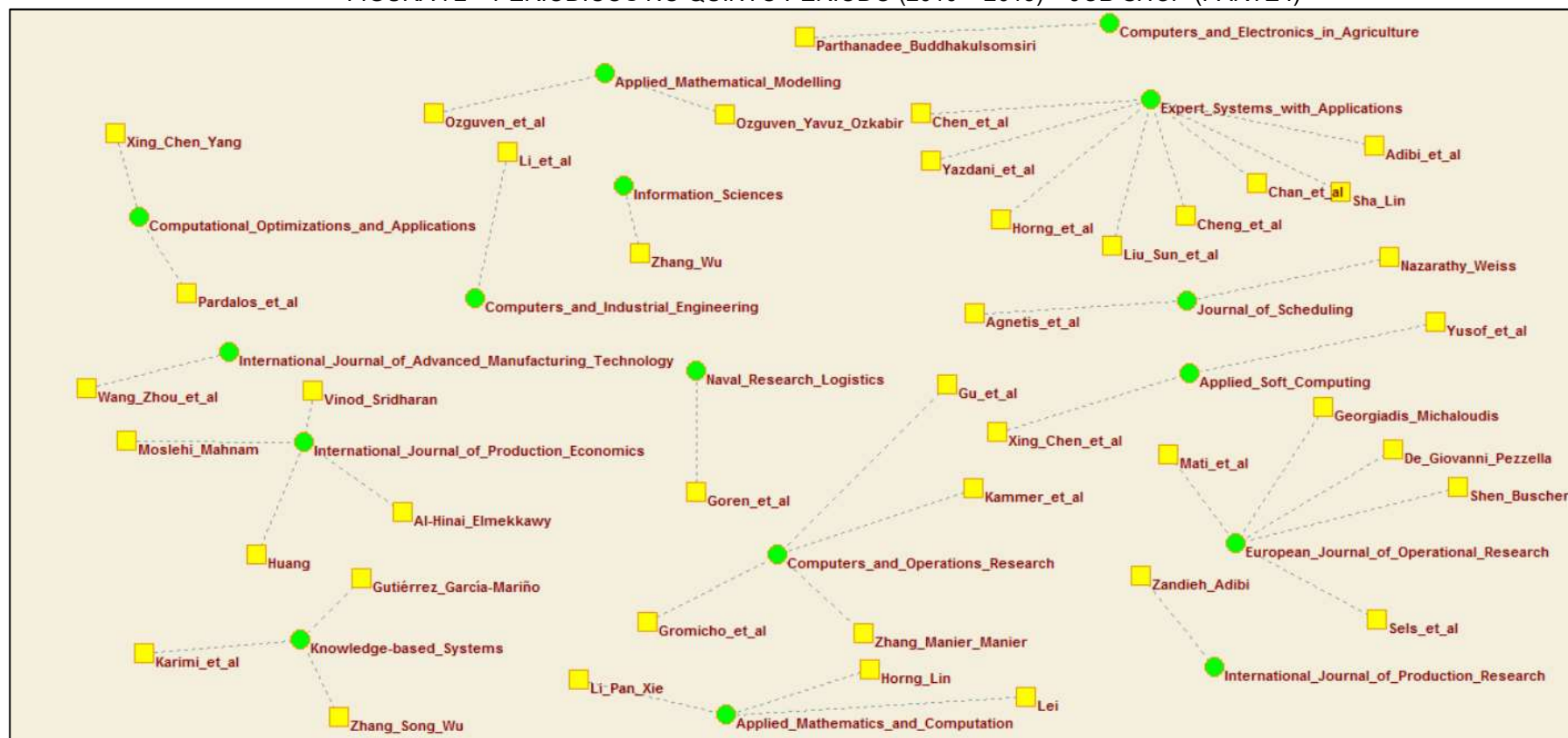
6.10.5.1 Quinto Período – Parte I

Nessa primeira parte da análise, no tangente à quantidade de artigos publicados, destaca-se a *Expert Systems with Applications*, com 8 de 41 estudos nela apresentados. A se destacar aqui também a EJOR, posto que esta tem 5 trabalhos aqui categorizados.

Dentre os autores, destaca-se Zandieh, que é autor ou co-autor de 4 dos 41 artigos a esse estrato restritos. Além disso, seus estudos são publicados em três periódicos distintos, a saber, a *Expert Systems with Applications*, com 2 destes e tanto a *International Journal of Production Research* como a *Knowledge-based Systems*, com um.

O autor tem como característica marcante em seus trabalhos o uso da meta-heurística VNS, de forma hibridizada ou não. Além disso, um tema comum em dois de seus trabalhos é a quebra aleatória de máquinas, em *Job Shops* dinâmicos.

A Figura 72 traz os autores e periódicos correlatos a esse primeiro estrato da análise.

FIGURA 72 – PERIÓDICOS NO QUINTO PERÍODO (2010 – 2015) – *JOB SHOP* (PARTE I)

FONTE: O Autor (2016).

6.10.5.2 Quinto Período – Parte II

Em relação a esse segmento do Quinto Período, no tangente à quantidade de artigos publicados, destacam-se os periódicos *Computers and Operations Research* e *International Journal of Production Economics*, com 9 e 8 dos 42 estudos nela publicados, respectivamente.

Dentre os autores, destacam-se Xu, Yuan e Pan, com três artigos cada. Xu e Yuan escreveram em conjunto estes três artigos. Tanto eles como Pan publicaram cada um de seus estudos em periódicos distintos. Xu e Yuan publicaram na *Computers and Operations Research*, *Computers and Industrial Engineering* e *Applied Soft Computing*. Pan publicou na *International Journal of Production Economics*, *Applied Mathematical Modelling* e *International Transactions in Operational Research*.

Em relação a Xu e Yuan tem-se como características marcantes dos seus trabalhos a utilização de hibridações no que tange ao tipo de método resolutivo e o estudo de *Job Shop* flexível, no que concerne ao ambiente fabril. Em todos os seus artigos publicados, os autores utilizaram como objetivo a minimização do *makespan*.

No que concerne aos trabalhos cuja autoria ou co-autoria pertence a Pan, tem-se como características marcantes o trabalho com modelos multi-objetivo e com meta-heurísticas pouco usuais na Programação da Produção, como Colônia de Abelhas e Algoritmo de Reação Química (CRO – *Chemical Reaction Optimization*). No que tange a características trabalhadas pelo autor, tem-se um espectro mais amplo, contemplando de tempos de processamento difusos à temática das disponibilidades e indisponibilidades da máquina, tecendo considerações acerca de variações no planejamento das manutenções preventivas.

A Figura 73 traz a rede que representa esse último estrato no que concerne à análise da presente métrica.

FONTE: O Autor (2016).

Em síntese, a análise dessa métrica mostra que o estudo do *Job Shop* tem um caráter multifacetado. Devido a isso, há tantos periódicos que tratam a respeito do tema.

O estudo destes nos permite entender a evolução do estudo da temática ao longo destas cinco décadas analisadas. Primeiramente, houve o predomínio de publicações mais voltadas à Administração, como a *Management Science*, a *Journal of Operations Management*, entre outras, cujo foco era mais voltado à simulação e geração de cenários, com a finalidade de se estudar diversos critérios de otimalidade, utilizando métodos heurísticos e preocupados com o significado prático de suas descobertas.

Com o passar dos tempos, os periódicos mais voltados ao caráter computacional do estudo desse ambiente fabril passaram a ser predominantes, como a *Computers and Operations Research*, *EJOR*, *Computers and Industrial Engineering*, entre outras. Nestas, apresentam-se tanto uma fundamentação teórico-matemática acerca dos conceitos correlatos ao *Job Shop*, como se apresentam métodos mais avançados de resolução, como hibridações e meta-heurísticas, para problemas cada vez mais complexos, como ambientes flexíveis e multiobjetivos.

Assim como no capítulo anterior o ponto fulcral é analisar sob que prisma o estudo que se pretende publicar em revistas de alto impacto como as pertencentes ao escopo dessa revisão está voltado, para que se possa escolher o melhor periódico para tal.

6.11 QUADRO-SÍNTESE DE *JOB SHOP*

O estudo e análise de todas as métricas utilizadas estão sumarizadas no Quadro 4. Nas linhas, tem-se os autores dos artigos e nas colunas as métricas abordadas ao longo do capítulo.

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continua)

QUADRO 57. CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE TCC CITEI, DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continua)																				
Autores	Tipo Artigo				Classe Prog. Prod.		Modo Chegada Itens		Natureza Geração Dados			Característica dos Itens	Critérios de Otimalidade	Tipo Métodos						
	Problemas	Complexidade	Comparação	Review	Off-line	On-line	Estático	Dinâmico	Determinístico	Estocástico	Determinístico/Estocástico			Exato	Heurístico	Meta-heurístico	Híbrido	Não-Especificado	Simulação	RP
Thompson (1960)				X	X		X		X			Clássico	Makespan	X	X				X	
Wilbrecht; Prescott (1969)	X		X		X		X		X			Setup	Valor do trabalho em processo; Número de tarefas completadas por semana; Número de itens enviados por semana; Número de tarefas atrasadas por semana; Distribuição dos tempos de conclusão; Tempo de espera do item; Número de itens em fila; Utilização da capacidade; Número de itens em fiila há mais de uma semana; Tamanho dos itens há mais de uma semana		X					

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Bozoki; Richard (1970)	X				X		X		X			Processamento contínuo	Makespan				X			
Panwalkar (1973)	X				X		X		X			Janelas de tempo	Tempo total de conclusão	X						
Holloway; Nelson (1974a)	X		X		X		X		X			Datas de entrega	Número de itens atrasados; Atraso médio; Atraso máximo; Variância do atraso		X					
Holloway; Nelson (1974b)	X				X		X	X	X			Datas de entrega; Hora extra	Número de horas extras		X					
Holloway; Nelson (1975)	X		X		X		X		X			Overlapping	Minimização da extensão das violações de precedência		X					
Lageweg et al. (1977)	X				X		X		X			Clássico	Makespan				X			
Nelson et al. (1977)	X		X		X			X		X		Datas de entrega	Atraso total		X				X	
Sculli (1980)	X		X		X		X				X	Operações de montagem; Atrasos aleatórios	Throughput do centro de peças; Tempo médio de fluxo; Atraso médio; Porcentagem de itens atrasados		X					
Pinedo (1981)		X			X		X			X		Clássico	Makespan esperado					X		
Deckro et al. (1982)	X				X		X		X			Clássico	Throughput do item; Makespan; Lateness total; Atraso total	X						

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Kanet; Hayya (1982)	X		X		X		X		X		Datas de entregas itens. Datas de entrega das operações	Lateness médio; Desvio padrão do lateness; Fração de itens atrasados; Atraso médio condicional; Tempo médio de fluxo; Desvio padrão do tempo de fluxo; Atraso máximo		X				X	
Baker; Kanet (1983)	X		X		X		X		X		Datas de entrega itens; Datas de entrega das operações	Proporção de itens atrasados; Atraso médio condicional; Atraso médio total		X				X	
Elvers, Douglas A.; Taube (1983)	X		X		X		X			X	Datas de entrega itens; Datas de entrega das operações; Tempo real da operação	Latenes médio		X				X	
Elvers, Douglas A.; Taube (1983)	X		X		X		X			X	Tempo real da operação	Porcentagem de itens concluídos		X				X	
Smith; Seidmann (1983)				X	X		X	X		X	Datas de entrega	Não especificado							X
Baker (1984)				X	X			X		X	Datas de entrega	Atraso médio; Porcentagem de itens atrasados						X	X
Buzacott; Shanthikumar (1985)				X	X			X		X	Clássico	Média aproximada do tempo despendido; Desvio padrão do tempo despendido		X				X	

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Treleven; Elvers (1985)	X		X		X		X	X		X		Dupla restrição de recursos	Tempo médio em fila; Variância do tempo em fila; Lateness médio; Variância do lateness; Porcentagem de itens atrasados; Número total de transferências de funcionários		X					X	
Vepsalainen; Morton (1987)	X		X		X			X	X			Datas de entrega específicas; Penalidades por atraso	Atraso ponderado		X					X	
Grabowski; Janiak (1987)	X	X			X		X		X			Recurso não renovável continuamente divisível	Makespan	X	X						
Adams et al. (1988)	X	X	X		X		X		X			Máquina gargalo	Makespan		X						
Kanet (1988)	X		X		X		X		X			Bloqueio	Tempo médio de fluxo; Estoque; Atraso total		X					X	
Carlier; Pinson (1989)	X	X	X		X		X				X	Preempção	Makespan	X							
Kubiak (1989)	X	X			X		X		X			Sem espera; Tempos de processamento unitários	Makespan	X							

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Park; Bobrowski (1989)	X		X		X			X		X		Dupla restrição de recursos	Custo total por dia; Penalidade por atraso; Custo de estocagem; WIP; Custo de transferência do operador; Lateness médio; Tempo médio em fila; Tempo médio no backlog; Imobilidade diária do operador		X					X	
Philipoom et al. (1989)	X		X		X		X				X	Datas de entrega itens; Datas de entrega montagem; Datas de entrega das operações	Atraso médio; Raiz quadrada do atraso médio; Porcentagem de itens atrasados; Tempo médio de fluxo; Adiantamento médio; Lateness absoluto médio		X					X	
Brucker; Schlie (1990)	X				X		X		X			Máquinas multi-propósito	Makespan	X							
Scudder et al. (1990)	X		X		X			X			X	Datas de entrega	Valor presente líquido		X						X
Applegate; Cook (1991)	X		X		X		X		X			Preempção; Clássico	Makespan	X	X						
Wein; Ou (1991)	X		X			X	X	X			X	Preempção; Clássico; Manutenção; Falhas	Tempo médio de ciclo		X					X	
Gravel et al. (1992)	X		X			X	X			X		Setup; Dimensionamento de lotes; Kanban	Makespan; Número de setups; Utilização da máquina; WIP médio		X					X	

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Laarhoven et al. (1992)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X				
Wein; Chevalier (1992)	X		X		X			X		X		Datas de entrega; Falhas; Reparos	WIP; Lead time da data de entrega; Proporção de itens atrasados		X				X	
Adam et al. (1993)	X		X		X		X			X		Datas de entrega itens; Datas de entrega operações; Montagem	Lead time; Lateness; Atraso condicional; Porcentagem de itens atrasados		X				X	
Amico; Trubian (1993)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Brandimarte (1993)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan; Atraso ponderado total		X	X				
Kanet; Zhou (1993)	X		X		X		X			X		Datas de entrega	Atraso médio; Porcentagem de itens atrasados		X				X	
Melnyk et al. (1994)	X		X		X		X				X	Datas de liberação; Datas de entrega	Tempo médio de fluxo; Número de itens atrasados; Atraso médio; Capacidade		X				X	

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Quadro 07: Caracterização dos Artigos de JCB citados de acordo com a taxonomia RCT-CTA (continuação)																				
	X		X		X		X		X		Clássico	Utilização da máquina; Tempo ocioso total; Total de itens concluídos; Porcentagem de itens concluídos; Número de operações concluídas; Tempo total de espera dos itens; Número de itens atrasados; Custo de ociosidade da máquina; Custo da espera do item; Custo total dependente da sequência; Custo dependente da sequência por unidade de item concluída		X					X	
Abdallah (1995)																				
Barnes; Chambers (1995)	X		X		X		X		X		Clássico	Makespan		X	X					
Della Croce et al. (1995)	X		X		X		X		X		Clássico	Makespan			X					
Dorndorf; Pesch (1995)	X		X		X		X		X		Clássico	Makespan		X	X	X				
Golenko-Ginzburg et al. (1995)	X		X		X		X		X		Clássico	Desempenho de entrega; Makespan		X						X
Herrmann et al. (1995)	X				X		X		X		Setup dependente da sequência	Desempenho de entrega; Throughput		X	X					X

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Jensen et al. (1995)	X		X		X		X		X		Importância do item	Tempo médio de fluxo; Atraso ponderado médio; Raiz quadrada do atraso médio		X				X	
Kim; Bobrowskj (1995)	X		X		X			X		X	Setup dependente da sequência	Custo total diário médio; Número de itens; Carga de trabalho; Desvio padrão do atraso		X				X	
Low (1995)	X		X		X		X		X		Setup dependente da sequência; Setup independente da sequência; Clássico	Tempo médio de fluxo; Atraso médio; Tempo ocioso médio da máquina		X					
Lourenço (1995)	X		X		X		X		X		Clássico	Makespan	X	X	X				
Sadeh et al. (1995)	X		X			X	X		X		Janelas de tempo não relaxáveis	Factibilidade em menor tempo computacional		X					
He et al. (1996)	X		X		X		X		X		Datas de entrega	Atraso total; Atraso médio total; Número médio de itens atrasados		X	X				
Kubiak et al. (1996)	X	X			X		X		X		Setup; Recirculação	Tempo médio de fluxo	X	X					
Kubiak; Timkovsky (1996)	X	X			X		X		X		Tempos de processamento unitários	Tempo total de conclusão	X						
Kuroda; Wang (1996)	X		X		X		X	X		X	Datas de entrega difusas; Tempos de processamento difusos	Lateness; Nota da Função Membro	X						

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Nowicki; Smutnicki, Czeslaw (1996)	X	X	X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Sadeh; Fox (1996)	X	X	X			X	X		X			Janelas de tempo não relaxáveis	Factibilidade em menor tempo computacional		X					
Choi; Korkmaz (1997)	X	X	X		X		X		X			Setup separável dependente da sequência	Makespan		X					
Dauzère-Pérès; Paulli (1997)	X		X		X			X	X			Geral	Makespan		X	X				
Fang; Xi (1997)	X		X			X		X	X			Quebras de máquinas; Reparos; Datas de entrega; Setup dependente da sequência	Makespan		X	X				
Lee; Dagli (1997)	X		X		X		X		X			Clássico	Lead time; Custo total de produção				X			
Lee; Posner (1997)	X	X			X		X		X			Geral; Periódico	Tempo de ciclo; Makespan clássico; Makespan MPS	X						
Balas; Vazacopoulos (1998)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Cheng; Jiang (1998)	X		X		X			X		X		Clássico	Lateness absoluto médio; Quadrado médio do lateness		X					X
Luh et al. (1998)	X				X		X		X			Setup dependente do grupo; Buffers finitos	Atrasos e adiantamentos ponderados; Atrasos e adiantamentos quadráticos	X	X					
Kravchenko (1998)	X	X			X		X		X			Sem espera; Tempos de processamento unitários	Tempo médio de fluxo	X						

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Wu et al. (1999)	X		X		X			X	X			Distúrbios aleatórios	Atraso ponderado	X	X				X	
Holthaus (1999)	X		X			X		X		X		Quebras de máquinas	Tempo médio de fluxo; Tempo de fluxo máximo; Variância do tempo de fluxo; Atraso médio; Atraso máximo; Porcentagem de itens atrasados; Variância do atraso		X				X	
Neumann; Schneider (1999)	X	X	X		X		X			X		Restrições estocásticas de precedência	Makespan esperado		X					
Pinedo; Singer (1999)	X		X		X		X		X			Datas de liberação	Atraso ponderado total		X					
Sabuncuoglu; Bayiz (1999)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X					
Litchfield; Narasimhan (2000)	X		X		X		X			X		Setups; Lote de transferência	Atraso médio		X					
Pezzella; Merelli (2000)	X		X		X		X		X			Clássico	Tempo médio de fluxo; Variância do tempo de fluxo; Lateness médio		X	X				
Boudoukh et al. (2001)	X	X	X		X		X			X		Itens idênticos; Itens similares; Estoques de segurança	Makespan		X					
Cheung; Zhou (2001)	X		X		X		X		X			Setup dependente da sequência	Makespan		X	X	X			
Wang; Zheng (2001)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X	X			
Yang; Wang (2001)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Zhou et al. (2001)	X		X		X		X		X			Geral	Makespan		X	X	X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

	X		X		X		X				Datas de entrega específicas; Penalidades por atraso	Atraso ponderado total		X						
Asano; Ohta (2002)																				
Dai; Weiss (2002)	X	X				X	X			X	Estoques de segurança	Makespan		X						
Esquivel et al. (2002)	X		X		X		X				Clássico	Makespan (SO); Makespan multi objetivo (MO); Adiantamento total (MO); Tempo ponderado de conclusão (MO); Makespan (MO e Pareto ótimo); Desvio absoluto médio da data de entrega comum (MO e Pareto ótimo)			X	X				
Golenko-Ginzburg; Gonik (2002)	X				X			X			X	Geral	Valor médio da penalidade total; Custos estocagem		X					
Mascis; Pacciarelli (2002)	X	X	X		X		X		X			Bloqueio; Sem espera	Makespan	X	X					
Sabuncuoglu; Comlekci (2002)	X		X		X			X		X		Clássico	Lateness médio; D. P. do lateness; Atraso médio; Quadrado médio do lateness; Lateness abs. médio; Lateness semiquadrático médio; Tempo médio de fluxo		X					X

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Steinhöfel et al. (2002)	X	X	X		X		X		X			Clássico	Makespan			X				
Tarantilis; Kiranoudis (2002)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X				
Yoshitomi (2002)	X		X		X		X			X		Tempos de processamento aleatórios	Makespan esperado			X			X	
Bertsimas et al. (2003)	X	X	X		X		X		X			Clássico	Custo total de estocagem			X				
Chen; Luh (2003)	X	X	X		X		X		X			Clássico	Atrasos e adiantamentos ponderados			X				
Kis (2003)	X		X		X		X		X			Rotas de processamento alternativas	Makespan			X				
Lengyel et al. (2003)	X		X		X			X		X		Just in time	Somatório das penalidades; Soma dos atrasos; Somatório dos itens concluídos; Lateness máximo; Lateness mínimo; Lateness absoluto médio; Quadrado médio do lateness; Taxa máxima de conclusão; Taxa mínima de conclusão; Taxa média de conclusão			X			X	
Schuster; Framinan (2003)	X		X		X		X		X			Sem espera	Makespan			X	X	X		
Yoshitomi; Yamaguchi (2003)	X		X		X		X			X		Tempos de processamento aleatórios	Makespan esperado			X	X		X	

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Mattfeld; Bierwirth (2004)	X		X		X			X	X			Datas de liberação; Deadlines; Recirculação	Tempo médio ponderado de fluxo; Atraso ponderado médio; Atraso máximo; Número ponderado de itens atrasados		X	X				
Meloni et al. (2004)	X	X	X		X		X		X			Sem espera; Bloqueio	Makespan		X	X				
Murovec; Šuhel (2004)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan	X			X			
Sung Lee et al. (2004)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Wenqi; Aihua (2004)	X	X	X		X		X		X			Clássico	Makespan				X			
Woeginger (2004)	X	X			X		X		X			Sem espera	Makespan		X					
Alvarez-Valdes et al. (2005)	X					X		X	X			Sem espera; Overlapping	Custo do tempo de conclusão dos itens; WIP		X					
Cavory et al. (2005)	X				X		X		X			Restrições lineares de recursos	Tempo médio de ciclo		X	X			X	
De Bontridder (2005)	X		X		X		X		X			Datas de liberação; Janelas de tempo; Restrições gerais de precedência	Atraso ponderado total		X	X				
Gonçalves et al. (2005)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X		X			
Hurink; Knust (2005)	X		X		X		X		X			Tempos de transporte; Tempos de movimentação com o robô vazio	Makespan		X	X	X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Jansen et al. (2005)	X	X				X	X			X		Tempos de processamento controláveis; Preempção	Makespan; Custo do controle do tempo; Makespan e Custo do controle do tempo		X						
Low et al. (2005)	X		X		X		X		X			Recirculação	Tempo total de fluxo; Atraso total; Tempo ocioso da máquina; Critério global (MO – junta-se os três critérios em um)	X	X						
Nowicki; Smutnicki (2005)	X	X	X		X		X		X			Clássico	Makespan			X					
Pan; Chen (2005)	X		X		X		X		X			Recirculação	Makespan	X							
Tavakkoli-Moghaddam; Daneshmand-Mehr (2005)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X					X	
Tavakkoli-Moghaddam et al. (2005)	X		X		X		X			X		Clássico	Soma da variação do tempo planejado e o tempo real; Custos operacionais; Custo da ociosidade da máquina	X			X				
Zhou et al. (2005)	X				X		X		X			Setup dependente da sequência	Makespan			X					
Zoghby et al. (2005)	X				X			X	X			Setup dependente da sequência; Recirculação	Atraso médio		X						

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

	X				X		X				Tempos de processamento unitários das operações	Tempo total de conclusão	X							
Al-Anzi et al. (2006)																				
Framinan; Schuster (2006)	X		X		X		X				Sem espera	Makespan		X	X					
Lian et al. (2006)	X		X		X		X				Clássico	Makespan			X					
Liu, T.-K. et al. (2006)	X		X		X		X				Clássico	Makespan				X				
Ohta; Nakatani (2006)	X		X		X		X				Datas de entrega	Custos totais de estocagem	X	X						
Pathumnakul; Egbelu (2006)	X		X		X		X				Deadlines	Soma ponderada dos adiantamentos		X						
Ren; Weng (2006)	X		X		X		X	X			Clássico	Atraso médio		X					X	
Sha; Hsu (2006)	X		X		X		X				Clássico	Makespan		X		X				
Blazewicz et al. (2007)	X	X			X		X				Data de entrega comum	Número ponderado do trabalho atrasado	X							
Brucker; Kampmeyer (2007)	X		X		X		X				Bloqueio	Tempo de ciclo		X	X					
El-Bouri et al. (2007)	X		X		X		X				Clássico	Makespan			X	X				
Gao et al. (2007)	X		X		X		X				Clássico	Makespan (MO e soma ponderada – SP); Carga de trabalho máxima da máquina (MO e SP); Carga de trabalho total das máquinas (MO e SP)				X				
Gröflin; Klinkert (2007)	X	X			X		X	X			Sem espera; Bloqueio	Makespan						X		
Heinonen; Pettersson (2007)	X		X		X		X				Clássico	Makespan		X	X					
Ho et al. (2007)	X		X		X		X				Recirculação	Makespan		X	X					

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Petrovic et al. (2007)	X		X		X		X			Clássico	Makespan; Número de itens atrasados; Penalidade		X	X				
Tsai et al. (2007)	X		X		X		X			Clássico	Makespan			X	X			
Zhang et al. (2007)	X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Artigues; Feillet (2008)	X		X		X		X			Setup dependente da sequência	Makespan	X						
Caumond et al. (2008)	X		X		X		X			Janelas de tempo das operações sucessivas de um mesmo item	Makespan		X	X				
Essafi et al. (2008)	X		X		X		X			Datas de liberação	Atraso ponderado total				X			
Gao et al. (2008)	X		X		X		X			Clássico	Makespan (MO, SP e prioridades diferentes (PD)); Carga de trabalho máxima da máquina (MO, SP e PD); Carga de trabalho total das máquinas (MO, SP e PD)				X			
Huang; Liao (2008)	X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X	X			
Huang; Yang (2008)	X		X		X		X			Janelas de tempo	Custo dos atrasos e adiantamentos			X				
Liaw (2008)	X		X		X		X			Sem espera	Makespan		X	X				
Pezzella et al. (2008)	X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan		X	X				
Niu et al. (2008)	X		X		X			X		Tempos de processamento difusos	Makespan difuso				X			
Vilcot; Billaut (2008)	X		X		X		X			Setup dependente da sequência	Makespan; Lateness máximo				X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Vinod; Sridharan (2008)	X		X		X			X		X		Setup dependente da sequência	Tempo médio de fluxo; Atraso médio; Tempo médio de setup; Número médio de setups		X					X	
Zhang, C. Y. et al. (2008)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan				X				
Zhang, C. et al. (2008)	X		X		X		X		X			Geral	Makespan		X	X					
Abdelmaguid (2009)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan	X	X						
Božejko; Makuchowski (2009)	X		X		X		X		X			Sem espera	Makespan				X				
Fattahi et al. (2009)	X		X		X		X		X			Overlapping das operações	Makespan	X		X	X				
Liu; Kozan (2009)	X		X		X		X		X			Bloqueio	Makespan				X				
Luh; Chueh (2009)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X					
Manikas; Chang (2009)	X		X		X		X		X			Setup dependente da sequência; Datas de liberação escalonadas; Recirculação	Adiantamento (MO, SP); Atraso (MO, SP); Ranking de cliente por item (MO, SP); Makespan (MO, SP)		X	X					
Penn; Raviv (2009)	X		X		X		X		X			Recirculação	Maximização das receitas		X						
Topaloglu; Kilincli (2009)	X		X		X		X		X			Recirculação	Makespan		X						
Wang et al. (2009)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X					
Wong et al. (2009)	X		X		X		X		X			Overlapping; Restrição de recursos	Custo do lateness total; Makespan; Custo total de estocagem; Custo total do setup		X	X					

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Xing et al. (2009)	X		X		X		X			Clássico	Makespan (MO, SP); Carga de trabalho máxima da máquina (MO, SP); Carga de trabalho total das máquinas (MO, SP)		X	X				
Zhang et al. (2009)	X		X		X		X			Clássico	Makespan (MO, SP); Carga de trabalho máxima da máquina (MO, SP); Carga de trabalho total das máquinas (MO, SP)				X			
Zhou et al. (2009)	X		X		X		X			Clássico	Atraso ponderado total		X	X	X			
Adibi et al. (2010)	X		X		X			X		X	Quebras de máquinas	Makespan (MO, SP); Atraso total (MO, SP)		X		X		
De Giovanni; Pezzella (2010)	X		X		X		X			Máquinas multi-propósito	Makespan			X	X			
Gu et al. (2010)	X		X		X				X		Clássico	Makespan esperado			X			
Huang (2010)	X		X		X		X				Quebras de lotes; Overlapping; Setup independente da sequência	Custo do fluxo (Estocagem); Custo do tempo ocioso da máquina; Custo total de transporte			X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Li et al. (2010)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan (MO, SP); Carga de trabalho máxima da máquina (MO, SP); Carga de trabalho total das máquinas (MO, SP)		X		X			
Nazarathy; Weiss (2010)	X		X			X	X			X		Preempção; Divisão dos itens	Makespan		X					X
Özgüven et al. (2010)	X		X		X		X		X			Flexibilidade de rotas; Flexibilidade do plano de processo	Makespan – 1; Makespan – 2	X						
Pardalos et al. (2010)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X				
Parthanadee; Buddhakulsomsiri (2010)	X		X		X			X		X		Setup dependente da sequência; Datas de entrega das operações	Tempo médio de fluxo; Número médio de itens atrasados; Atraso médio		X					X
Sha; Lin (2010)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan (MO); Atraso total (MO); Tempo ocioso total (MO)			X				
Xing et al. (2010)	X		X		X		X		X			Recirculação	Makespan		X	X	X			
Yazdani et al. (2010)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Zandieh; Adibi (2010)	X		X		X			X			X	Quebras de máquinas	Tempo médio de fluxo		X		X			
Agnetis et al. (2011)	X	X	X		X		X		X			Dupla restrição de recursos; Overlapping; Uma unidade de recurso; Recursos adicionais	Makespan	X	X					

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Al-Hinai; ElMekkawy (2011)	X		X			X	X				X	Quebras de máquinas	Makespan previsto; Makespan real; M1; M2; M3				X			
Chan et al. (2011)	X				X		X		X			Setup dependente da sequência; Divisão de itens	Makespan		X	X				
Cheng, H.-C. et al. (2011)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan (MO e Pareto ótimo); Atraso total (MO e Pareto ótimo)		X	X	X			
Gutiérrez; García-Magariño (2011)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X				
Kammer et al. (2011)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan; Soma do makespan e penalidades por não comunalidades			X				
Liu et al. (2011)	X		X		X		X		X			Peça única; Lotes pequenos; Produção customizada	Tempo médio de transferência				X			
Mati et al. (2011)	X	X	X		X		X		X			Datas de liberação	Makespan; Tempo total ponderado de fluxo; Atraso ponderado total; Soma ponderada de itens atrasados; Atraso máximo		X					

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Moslehi; Mahnam (2011)	X		X		X		X			Datas de liberação	Makespan (MO, SP); Carga de trabalho máxima da máquina (MO, SP); Carga de trabalho total das máquinas (MO, SP)		X	X				
Sels et al. (2011)	X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X	X			
Vinod; Sridharan (2011)	X		X		X		X		X	Clássico	Tempo médio de fluxo; Atraso médio; Lateness absoluto médio; Desvio padrão do tempo de fluxo; Desvio padrão do atraso; Desvio padrão do lateness absoluto; Porcentagem de itens atrasados; Fluxo de allowance médio; Fator médio de fluxo		X				X	
Xing et al. (2011)	X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan		X	X	X			
Yusof et al. (2011)	X		X		X		X			Clássico	Makespan		X	X	X			
Chen et al. (2012)	X		X		X		X			Recirculação	Makespan (MO); Atraso total (MO); Tempo ocioso total (MO)		X	X	X			
Georgiadis; Michaloudis (2012)	X		X		X		X		X	Recirculação; Setup Independente da sequência; Quebras de máquinas	WIP médio; Backlog médio; Média de itens atrasados;		X				X	

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Goren et al. (2012)	X		X		X		X		X		Quebras de máquinas	Makespan esperado; Makespan; Soma das variâncias dos tempos de conclusão da programação realizada	X	X	X				
Gromicho et al. (2012)	X	X	X		X		X		X		Clássico	Makespan	X						
Horng et al. (2012)	X		X		X		X		X		Tempos de processamento aleatórios	Custo de estocagem (Situação econômica – SE); Penalidades por atraso (SE)		X	X			X	
Horng; Lin (2012)	X		X		X		X			X	Tempos de processamento aleatórios	Custo de estocagem (SE); Penalidades por atraso (SE)		X		X		X	
Karimi et al. (2012)	X		X		X		X		X		Rotas alternativas	Makespan			X	X			
Lei (2012)	X		X		X		X		X		Quebras de máquinas aleatórias; Itens resumíveis; Tempos de processamento normalmente distribuídos	Makespan			X				
Li et al. (2012)	X		X		X		X		X		Rotas alternativas	Makespan (MO); Carga de trabalho da máquina crítica (MO); Carga de trabalho total da máquina (MO)		X		X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Özgüven et al. (2012)	X		X		X		X			Setup não separável dependente da sequência; Setup separável dependente da sequência; Flexibilidade do plano de processo	Makespan; Balanceamento das cargas de trabalho	X						
Shen; Buscher (2012)	X		X		X		X			Setup dependente da família de itens; Lotes seriados; Famílias de produtos	Makespan		X	X				
Wang, L. et al. (2012)	X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan			X				
Zhang, Q. et al. (2012)	X		X		X		X			Restrições de transporte; Tempos de processamento limitados	Makespan (MO e Pareto ótimo); Tempo de espera antes do processamento (MO e Pareto ótimo); Tempo espera depois do processamento (MO e Pareto ótimo)				X			
Zhang, R. et al. (2012)	X		X		X			X		Tempos de processamento aleatórios	Atraso ponderado total esperado		X	X	X			
Zhang; Wu (2012)	X		X		X		X			Clássico; Recirculação	Atraso total		X		X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Bülbül; Kaminsky (2013)	X		X		X		X			Datas de liberação	Custo da estocagem intermediária; Adiantamento ponderado total; Atraso ponderado total; Tempo total de conclusão ponderado; Makespan		X					
Chen; Matis (2013)	X		X		X		X		X	Datas de liberação; Recirculação	Atraso médio		X					
Cheng et al. (2013)	X		X		X		X			Clássico	Makespan				X			
Chiang; Lin (2013)	X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho máxima da máquina (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho total das máquinas (MO e Pareto ótimo)		X	X				
Ebadi; Moslehi (2013)	X		X		X		X			Preempção	Makespan	X						
Huang et al. (2013)	X		X		X		X			Janelas de entrega; Setup dependente da sequência	Soma ponderada dos atrasos e adiantamentos			X				

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Li; Pan (2013)	X		X		X		X		X		Tempos de processamento difusos; Manutenção flexível resumível; Manutenção flexível não-resumível; Manutenção fixa resumível; Manutenção fixa não-resumível	Makespan difuso				X			
Lobo et al. (2013)	X		X		X		X				Dupla restrição de recursos	Lateness máximo	X	X		X			
Mencia et al. (2013)	X		X		X		X				Clássico	Makespan	X	X					
Nie et al. (2013)	X		X		X			X		X	Datas de liberação	Makespan; Atraso médio; Tempo médio de fluxo; Lateness máximo		X		X			
Qing-dao-er-ji et al. (2013)	X		X		X		X				Clássico	Makespan (MO e Pareto ótimo); Capacidade de estocagem (MO e Pareto ótimo)				X	X		

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

QUADRO 57 CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE JOURNAL DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROF. COSTA (continuação)																				
	X		X			X		X			X	Quebras de máquinas	Tempo ponderado médio de fluxo; Tempo máximo de fluxo; Variância ponderada do tempo de fluxo; Atraso ponderado médio; Atraso máximo; Variância ponderada do atraso; Porcentagem de itens atrasados; Lateness médio ponderado; Lateness máximo; Variância ponderada do lateness; Nível de utilização das máquinas		X	X				X
Qiu; Lau (2013)																				
Rojas-Santiago et al. (2013)	X		X		X		X		X			Lotes; Clássico	Makespan		X	X				
Wang et al. (2013)	X		X		X			X			X	Distúrbios; Rotas alternativas; Operações não-resumíveis	Makespan; Makespan da programação consertada		X	X				
Xiong et al. (2013)	X		X		X		X				X	Quebras aleatórias de máquinas	Makespan (MO); Diferença relativa entre makespan real e makespa determinístico (MO)		X	X				
Yuan; Xu (2013a)	X		X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan		X		X			
Yuan; Xu (2013b)	X		X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan		X		X			
Yuan et al. (2013)	X		X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan				X			

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Zhang et al. (2013)	X		X		X		X		X		Datas de entrega	Atraso ponderado total; Makespan				X			
Guyon et al. (2014)	X		X		X		X			X	Datas de liberação; Datas de entrega; Recursos humanos flexíveis; Itens fictícios; Restrições de disponibilidade; Indisponibilidade não cruzável; Operações não-resumíveis	Custo mínimo da designação dos operadores às máquinas e turnos	X						
Jia; Hu (2014)	X		X		X		X				Rotas alternativas	Makespan (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho da máquina crítica (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho total das máquinas (MO e Pareto ótimo)		X		X			
Li et al. (2014)	X		X		X		X			X	Manutenção; Disponibilidade da máquina; Indisponibilidade da máquina	Makespan (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho da máquina crítica (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho total das máquinas (MO e Pareto ótimo)		X	X				

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Rossi (2014)	X		X		X		X			Rotas alternativas; Setup separável dependente da sequência; Setup independente da sequência; Overlapping; Tempos de transporte; Datas de liberação; Deadlines	Makespan		X		X			
Spanos et al. (2014)	X		X		X		X			Clássico	Makespan		X		X			
Zeng et al. (2014)	X		X		X		X			Bloqueio; Tempos de transporte; AGV	Makespan; Minimização do tempo de saída do último item no sistema		X					
Zhao et al. (2014)	X		X		X		X			Datas de entrega; Disponibilidade	Makespan (SO); Makespan (MO e Pareto ótimo); Atraso máximo (SO); Atraso máximo (MO e Pareto ótimo)			X				
Abdeljaouad et al. (2015)	X		X		X		X			Fluxo reverso	Makespan	X	X		X			
Abdelmaguid (2015)	X		X		X		X			Setup separável dependente da sequência; Recirculação	Makespan			X	X			
Birgin et al. (2015)	X	X	X		X		X			Rotas alternativas; Flexibilidade no sequenciamento	Makespan		X					
Cruz-Chávez et al. (2015)	X	X	X		X		X			Rotas alternativas	Makespan			X				

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Gao et al. (2015)	X		X		X			X	X			Rotas alternativas; Inserção de itens	Makespan; Média dos atrasos e adiantamentos; Carga de trabalho máxima da máquina; Carga de trabalho total da máquina		X						
González et al. (2015)	X		X		X		X		X			Janelas de tempo; Setup dependente da sequência	Makespan		X	X	X				
Kaplanoğlu (2015)	X		X		X		X		X			Rotas alternativas	Makespan (MO); Carga de trabalho da máquina crítica (MO); Carga de trabalho total das máquinas (MO);				X				
Lei; Guo (2015)	X		X		X		X				X	Dupla restrição de recursos; Tempos de processamento intervalados; Recursos heterogêneos	Makespan intervalado; Pegada de carbono			X					
Lin (2015)	X		X		X		X			X		Rotas alternativas; Tempos de processamento difusos	Makespan difuso				X				

QUADRO 37 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *JOB SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (conclusão)

Mokhtari; Dadgar (2015)	X		X			X	X			X		Manutenção preventiva; Datas de entrega; Operações não-resumíveis	Número de itens atrasados (melhor resultado); Número de itens atrasados (médio); Número de itens atrasados (pior resultado); Atraso máximo; Lateness total; Makespan; Tempo total de conclusão			X			X	
Murovec (2015)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan		X					
Palacios; González; et al. (2015)	X		X		X		X		X			Tempos de processamento difusos; Rotas alternativas	Makespan		X	X	X			
Peng et al. (2015)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan				X			
Shen; Yao (2015)	X		X		X	X		X	X			Rotas alternativas; Quebras de máquinas; Datas de entrega	Makespan (MO e Pareto ótimo); Atraso total (MO e Pareto ótimo); Carga de trabalho máxima da máquina (MO e Pareto ótimo); Estabilidade			X				
Zhang et al. (2015)	X		X		X			X	X			Quebras de máquinas	Tempo médio de fluxo; Tempo máximo de fluxo; Atraso médio; Atraso máximo; Número de itens atrasados				X			
Zhao et al. (2015)	X		X		X		X		X			Clássico	Makespan			X				

FONTE: O Autor (2017).

7 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA EM *OPEN SHOP*

Nas próximas seções realiza-se a RSL do *Open Shop*. Examinou-se 70 artigos nesta análise, no período compreendido entre 1976 e 2015. O Quadro 38 apresenta os artigos, em termos dos autores, periódico e ano de publicação.

QUADRO 38 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *OPEN SHOP* (continua)

Autor	Periódico
Gonzalez; Sahni (1976)	Journal of The ACM
Lawler et al. (1982)	Operations Research Letters
Pinedo (1982)	Advances in Applied Probability
Adiri; Amit (1983)	IEEE Transactions
Pinedo (1984)	European Journal of Operational Research
Liu; Bulfin (1985)	Operations Research Letters
Liu; Bulfin (1987)	Computers & Operations Research
Chung; Mohanty (1988)	Journal of Mathematical Analysis and Applications
De Werra et al. (1991)	Operations Research Letters
Frostig (1991)	Operations Research Letters
Strusevich (1993)	Computers & Operations Research
Brucker et al. (1993)	Operations Research Letters
Bräsel et al. (1994)	European Journal of Operational Research
Čepek et al. (1994)	Methods and Models of Operation Research
Galambos; Woeginger (1995)	Mathematical Methods of Operations Research
Vairaktarakis, George; Sahni (1995)	Naval Research Logistics
Kellerer et al. (1995)	Naval Research Logistics
Tautenhahn (1996)	Mathematical Methods of Operations Research
Chen et al. (1997)	Journal of Combinatorial Optimization
Tautenhahn; Woeginger (1997)	Operations Research Letters
Strusevich (1998)	Annals of Operations Research
Guéret; Prins (1998)	European Journal of Operational Research
Koulamas; Kyparisis (1998)	Naval Research Logistics
Lann et al. (1998)	Operations Research Letters
Liaw (1998)	European Journal of Operational Research
Drobouchevitch; Strusevich (1999)	Annals of Operations Research
Liaw (1999)	Computers & Operations Research

QUADRO 38 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *OPEN SHOP* (continuação)

Schuurman; Woeginger (1999)	Operations Research Letters
Kyparisis; Koulamas (2000)	Computers & Operations Research
Liaw (2000)	European Journal of Operational Research
Prins (2000)	Mathematical Methods of Operations Research
Liaw et al. (2002)	Computers & Operations Research
Liaw (2003)	Computers & Operations Research
Gupta et al. (2003)	International Transactions in Operational Research
Van den Akker et al. (2003)	Operations Research Letters
Liaw (2004)	Computers & Operations Research
Blum (2005)	Computers & Operations Research
Liaw (2005)	European Journal of Operational Research
Liaw et al. (2005)	Computers & Operations Research
Gribkovskaia et al. (2006)	Operations Research Letters
Shabtay; Kaspi (2006)	Naval Research Logistics
Kubzin et al. (2006)	Naval Research Logistics
Sha; Hsu (2008)	Computers & Operations Research
Lin et al. (2008)	International Journal of Production Economics
Matta (2009)	Computers & Operations Research
Naderi; Fatemi Ghomi; et al. (2010)	Computers & Operations Research
Roshanaei et al. (2010)	Expert Systems with Applications
Kis et al. (2010)	Operations Research Letters
Mastrolilli et al. (2010)	Operations Research Letters
Tang; Bai (2010)	Applied Mathematical Modelling
Zhang; Van de Velde (2010)	European Journal of Operational Research
Huang; Lin (2011)	Expert Systems with Applications
Cheng, T. C. E. et al. (2011)	Naval Research Logistics
Lin; Cheng (2011)	Naval Research Logistics
Panahi; Tavakkoli-Moghaddam (2011)	Expert Systems with Applications
Doulabi et al. (2012)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Khormali et al. (2012)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Bai; Tang (2013)	Applied Mathematical Modelling
Goldansaz et al. (2013)	Applied Mathematical Modelling

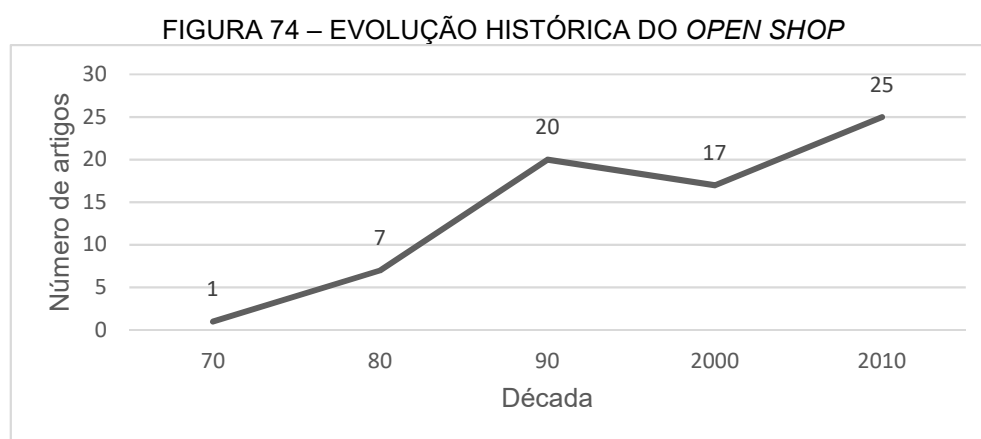
QUADRO 38 – ROL DOS ARTIGOS ANALISADOS DE *OPEN SHOP* (CONCLUSÃO)

Oulamara et al. (2013)	Annals of Operations Research
Liaw (2013)	Journal of Industrial and Production Engineering
Zhang; Bai (2014)	Applied Mathematical and Computation
Azadeh et al. (2015)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Liaw (2014)	Journal of Industrial and Production Engineering
Morady Gohareh et al. (2014)	International Journal of Advanced Manufacturing Technology
Naderi; Zandieh (2014)	International Journal of Production Economics
Naderi; Zandieh; et al. (2014)	International Transactions in Operational Research
Shamshirband et al. (2015)	Annals of Operations Research
Koulamas; Kyparisis (2015)	European Journal of Operational Research
Palacios; González-Rodríguez; et al. (2015)	Journal of Intelligent Manufacturing

FONTE: O Autor (2016).

7.1 ANO

Do mesmo modo que nos capítulos anteriores, esta métrica tem a finalidade precípua de identificar a evolução histórica do estudo do *Open Shop*, aqui representada pelo número de artigos publicados nos periódicos pertencentes ao escopo do presente estudo em cada década. A Figura 74 retrata esta evolução.



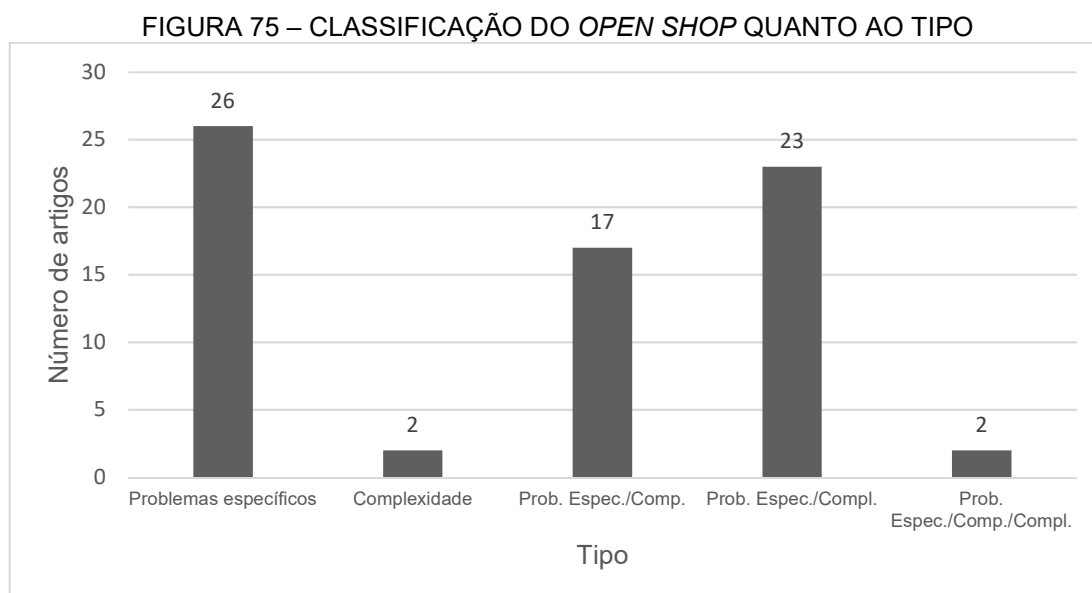
FONTE: O Autor (2016).

A partir da figura, verifica-se que 42 dos 70 artigos analisados foram publicados a partir de 2000. No entanto, os outros ambientes multi-máquinas previamente analisados nesta dissertação recebem maior atenção por parte dos pesquisadores do

que o *Open Shop*. Uma possível razão para tal ocorrência repousa no maior espaço de soluções que os problemas desse ambiente fabril tem, face à arbitrariedade de suas rotas de processamento (NOORI-DARVISH; MAHDVI; MAHDAVI-AMIRI, 2012).

7.2 TIPO

No tangente a essa métrica, os estudos foram tipificados em cinco categorias, a saber, Problemas específicos, quando há alguma aplicação, seja em caso real ou teórico; Complexidade, quando o artigo se detém à análise da complexidade algorítmica ou teórica do modelo de *Open Shop* por ele estudado; Problemas Específicos/Comparação, quando o autor não apenas contém uma aplicação, mas também há a comparação do resultado desta com o resultado obtido por outros autores, face a instâncias da literatura; Problemas Específicos/Complexidade, quando se avalia a complexidade algorítmica da aplicação ou método resolutivo aplicado e, ou, proposto; Problemas Específicos/Comparação/Complexidade, quando o estudo analisado engloba esses três pontos em sua análise. A Figura 75 retrata a classificação dos artigos de *Open Shop* verificados quanto ao tipo.



FONTE: O Autor (2016).

A partir da figura, observa-se que os artigos na categoria Problemas Específicos são aqueles encontrados em maior quantidade, com 26 artigos aqui classificados. Dentre estes, se pode citar o trabalho de Lawler et al. (1982) que trata

do *Open Shop* com Máquinas Paralelas, para o caso preemptivo e visando à minimização do *makespan*.

No extremo oposto estão os artigos que contemplam de maneira exclusiva a complexidade do *Open Shop* e aqueles que estão tipificados como Problemas Específicos/Comparação/Complexidade, ambos com dois trabalhos cada. No tangente ao primeiro, destaca-se o artigo de Liu e Bulfin (1985) que versa sobre a complexidade do *Open Shop* preemptivo.

Em relação ao segundo, tem-se o artigo de Oulamara et al. (2013) respectivo ao *Open Shop* com restrições de recursos. Neste estudo, os autores consideram a complexidade algorítmica, compara os resultados obtidos pelas heurísticas por eles empregadas no que tange ao desempenho destas e então, por meio de um exemplo, realiza a parte de aplicação do artigo.

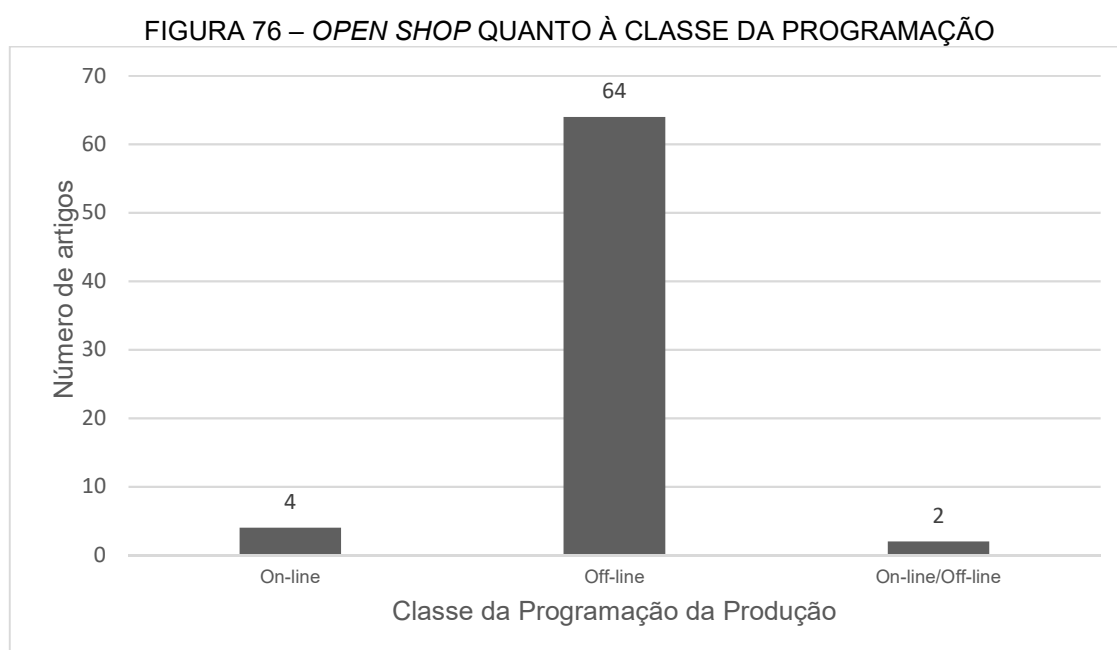
Os estudos que tratam conjuntamente Problemas Específicos e Comparação ou Problemas Específicos e Complexidade aparecem numa posição intermediária. No que diz respeito ao primeiro, Blum (2005) trabalha com a hibridação da busca em feixe (*beam search*) com a ACO. O autor compara os resultados obtidos por meio dessa combinação de métodos resolutivos com aqueles obtidos por outras metodologias, como os Algoritmos Genéticos. No tangente ao segundo, se pode citar o seminal trabalho de Gonzalez and Sahni (1976), posto que este traz em seu bojo tanto a faceta da aplicação quanto o ângulo da complexidade.

Outro aspecto relevante respectivo aos artigos que trazem, em algum momento de suas análises, o aspecto comparativo, é correlato às instâncias encontradas na literatura que são consideradas referências para os problemas de Programação da Produção. Nesse tocante, as mais comumente encontradas nos artigos são aquelas de Taillard (1993), que foi o primeiro autor a desenvolver instâncias de *Open Shop* na literatura. Tais instâncias propostas neste artigo tem como o problema mais difícil a ser resolvido aquele com 20 itens e 20 máquinas; Brucker et al. (1997) propôs outro conjunto de problemas para o *Open Shop*. Nestas instâncias, o problema com 7 itens e 7 máquinas é o de mais difícil otimização; Guéret e Prins (1999) propuseram outro conjunto de duras instâncias para este ambiente. Tal conjunto apresenta o problema com 10 itens e 10 máquinas como a instância mais complicada pelos autores desenvolvida.

Além dessas instâncias clássicas, alguns artigos utilizam conjuntos de problemas criados pelo próprio autor do trabalho, concernentes aos seus problemas específicos. Nesse contexto, se pode citar o artigo de Oulamara, Rebaine e Serairi (2009) que resolveram com o auxílio de métodos heurísticos, problemas de até 2000 itens e duas máquinas.

7.3 CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Em relação a essa métrica, os artigos verificados são classificados em *on-line*, *off-line* e *on-line/off-line*, quando o estudo, para efeitos de comparação, versa sobre ambas as classes. A Figura 76 traz a categorização dos artigos escrutinizados quanto à classe da Programação da Produção por estes trabalhos analisada.



FONTE: O Autor (2016).

No tangente aos resultados dessa métrica, é consideravelmente maior a quantidade de artigos de *Open Shop off-line*, se comparado com as demais categorias, posto que 64 dos 70 artigos versam sobre essa classe.

A respeito das demais, há que se tratar destas de maneira pormenorizada. Respectivo aos artigos que tratam do *Open Shop on-line* (4 dos 70), destaca-se aquele de Zhang e Van de Velde (2010), que trataram dessa classe em problemas com duas máquinas e janelas de tempo entre a conclusão da primeira operação e o início da

segunda. O tempo de processamento de cada operação de um dado item é apenas conhecido quando do término desta e duração da janela de tempo é ignota até a completude de seu decurso.

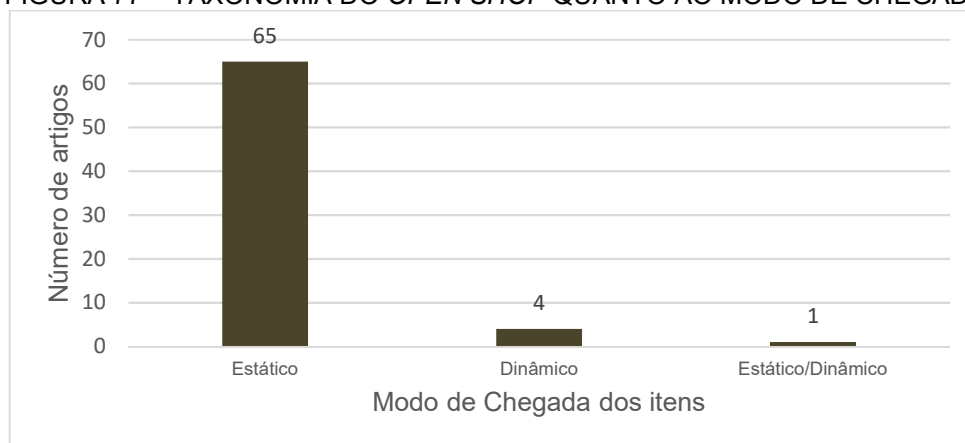
Dentre os trabalhos que se dedicam à comparação de ambas as classes, o artigo de Bai e Tang (2013) pode ser mencionado. Neste estudo, os autores comparam o *makespan* obtido no caso *off-line* com aquele obtido pela versão *on-line* do mesmo problema, no que concerne à razão de pior cenário (*worst-case ratio*), isto é, quantas vezes o *makespan* encontrado no *Open Shop on-line* é pior que o encontrado na versão *off-line* do problema.

A partir das análises e dos resultados graficamente apresentados, constata-se que o *Open Shop on-line* pode ser muito mais explorado no que diz respeito às pesquisas futuras.

7.4 MODO DE CHEGADA DOS ITENS

Nesta métrica, classifica-se os artigos em estático, dinâmico, ou estático/dinâmico, quando o estudo analisado versa sobre ambos os modos de chegada. A Figura 77 traz a representação gráfica da análise, em termo do número de artigos publicados por modo de chegada por eles apresentados.

FIGURA 77 – TAXONOMIA DO OPEN SHOP QUANTO AO MODO DE CHEGADA



FONTE: O Autor (2016).

A respeito dos resultados referentes a essa classe, verifica-se o predomínio do *Open Shop* estático, com 65 dos 70 artigos aqui contemplando tal modo de chegada.

No tangente às demais categorias, há apenas um artigo que contempla ambos os modos de chegada. Neste, Guéret e Prins (1998) tratam da possibilidade de

inserções e ressequenciamentos, que são baseados em um índice de prioridade dos tempos de processamento dos itens. Quando a faceta estática do problema é estudada, não há a atualização do índice de prioridade, portanto, o ressequenciamento não ocorre. Em sua forma dinâmica, este índice é atualizado a cada nova alocação, o que leva a novas programações.

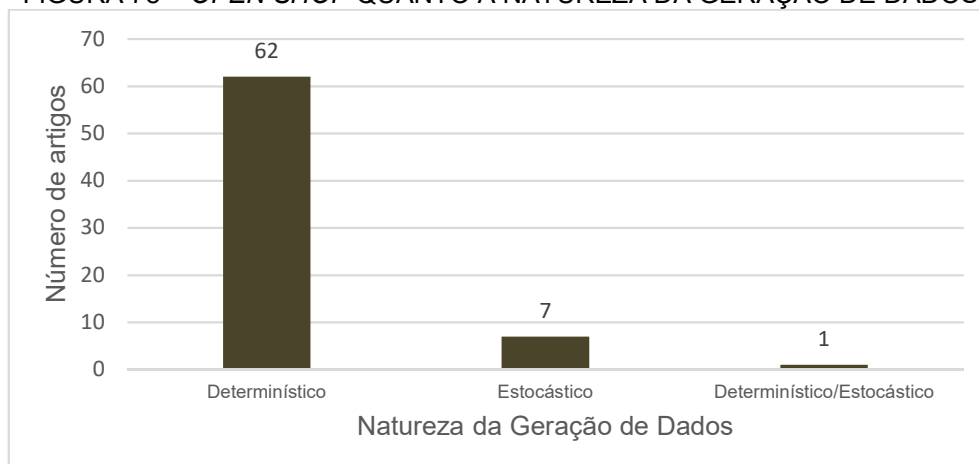
Dentre os artigos que abordam o *Open Shop* dinâmico, destaca-se aquele de Naderi et al. (2010), que estuda a inserção de itens ou operações, propondo heurísticas para tal e testando-as com o auxílio das instâncias conhecidas de Taillard, Brucker et al. e Guéret e Prins. Estas inserções contribuem à construção de novas programações e, ou, sequenciamentos.

A respeito dessa métrica, observa-se que o *Open Shop* dinâmico tem pouca exploração acadêmica, o que pode ser uma linha promissora no que concerne à pesquisa e trabalho futuros.

7.5 NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS

A respeito da natureza da geração dos dados, classificou-se os artigos em determinístico, estocástico e determinístico/estocástico, quando o artigo verificado lançou mão de um conjunto híbrido de dados. A Figura 78 traz gráfico que apresenta a classificação dos artigos à luz dessa métrica.

FIGURA 78 – OPEN SHOP QUANTO À NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS



FONTE: O Autor (2016).

Em relação aos artigos correlatos ao *Open Shop* estocástico, estes são bem pouco frequentes dentre os estudos escrutinizados, com apenas 7 artigos dedicados

a esta temática. Destes, se pode citar trabalho de Chung e Mohanty (1988) que utiliza a distribuição de Poisson na chegada dos itens e distribuição exponencial nos tempos de processamento.

No que concerne ao *Open Shop* determinístico, observou-se que nas análises referentes aos artigos que tratam da complexidade algorítmica, há o emprego de conjunto determinístico de dados. Dentre os trabalhos que usam tal tipo de dados, se pode citar aquele de Bräsel, Kluge e Werner (1994), que versam sobre o *Open Shop* com tempos unitários de execução. Neste tipo de problema, todas as operações de um dado item duram uma unidade de tempo (um segundo, por exemplo).

No tangente às publicações que contém um conjunto híbrido de dados, destaca-se o artigo de Azadeh et al. (2015), que trata de tempos de falha e reparo estocásticos. Os demais dados de entrada, como tempos de processamento, por exemplo, são determinísticos.

Em síntese, sob o prisma do que fora observado quando do estudo dessa métrica, observa-se a escassa utilização tanto de modelos estocásticos como de conjuntos híbridos de dados. Outro ponto a ser abordado repousa no exíguo emprego de outras distribuições de probabilidade diversas da uniforme, como a exponencial, a normal, a Weibull, entre outras. Tais aspectos constituem em prolíficas áreas atinentes à exploração futura em trabalhos a ser publicados concernentes a essa configuração produtiva.

7.6 CARACTERÍSTICA DOS ITENS

No que concerne à análise do *Open Shop* a partir dessa métrica, dividiu-se o período estudado em quatro períodos, quais sejam: Primeiro Período, compreendido entre 1976 e 1989; Segundo Período, entre 1990 e 1999; Terceiro Período, entre 2000 e 2009; e Quarto Período, entre 2010 e 2015.

7.6.1 Primeiro Período (1976 – 1989)

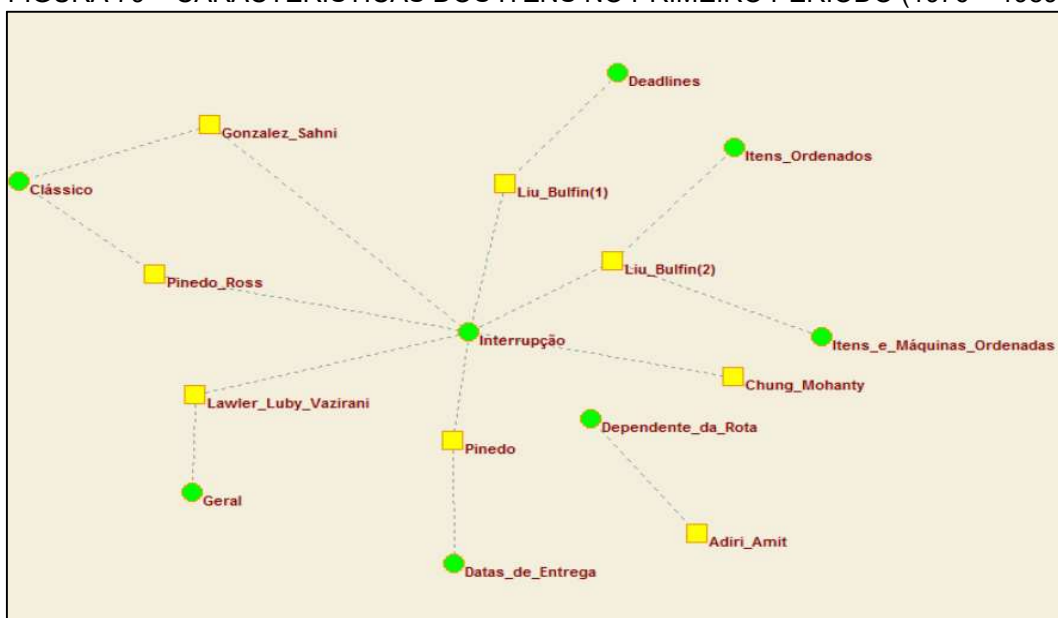
O Primeiro Período é marcado pela predominância de modelos preemptivos, algo que é verificado apenas quando do estudo do *Open Shop*. Nesse tocante, se

pode citar o artigo seminal de Gonzalez e Sahni (1976), que não apenas tratou dessa temática, para modelos com duas e três máquinas, como também estudou o modelo clássico de *Open Shop*.

Em relação a outras características abordadas, se pode citar o trabalho de Liu e Bulfin (1985) e Liu e Bulfin (1987). O primeiro abordou a complexidade do *Open Shop* preemptivo com *deadlines*, que são as datas máximas de entrega de um item.

No que concerne ao segundo, os autores abordaram a questão dos itens ordenados (*ordered jobs*), que é quando os itens apresentam ordem crescente dos tempos de processamento. A Figura 79 retrata esse período.

FIGURA 79 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)



FONTE: O Autor (2017).

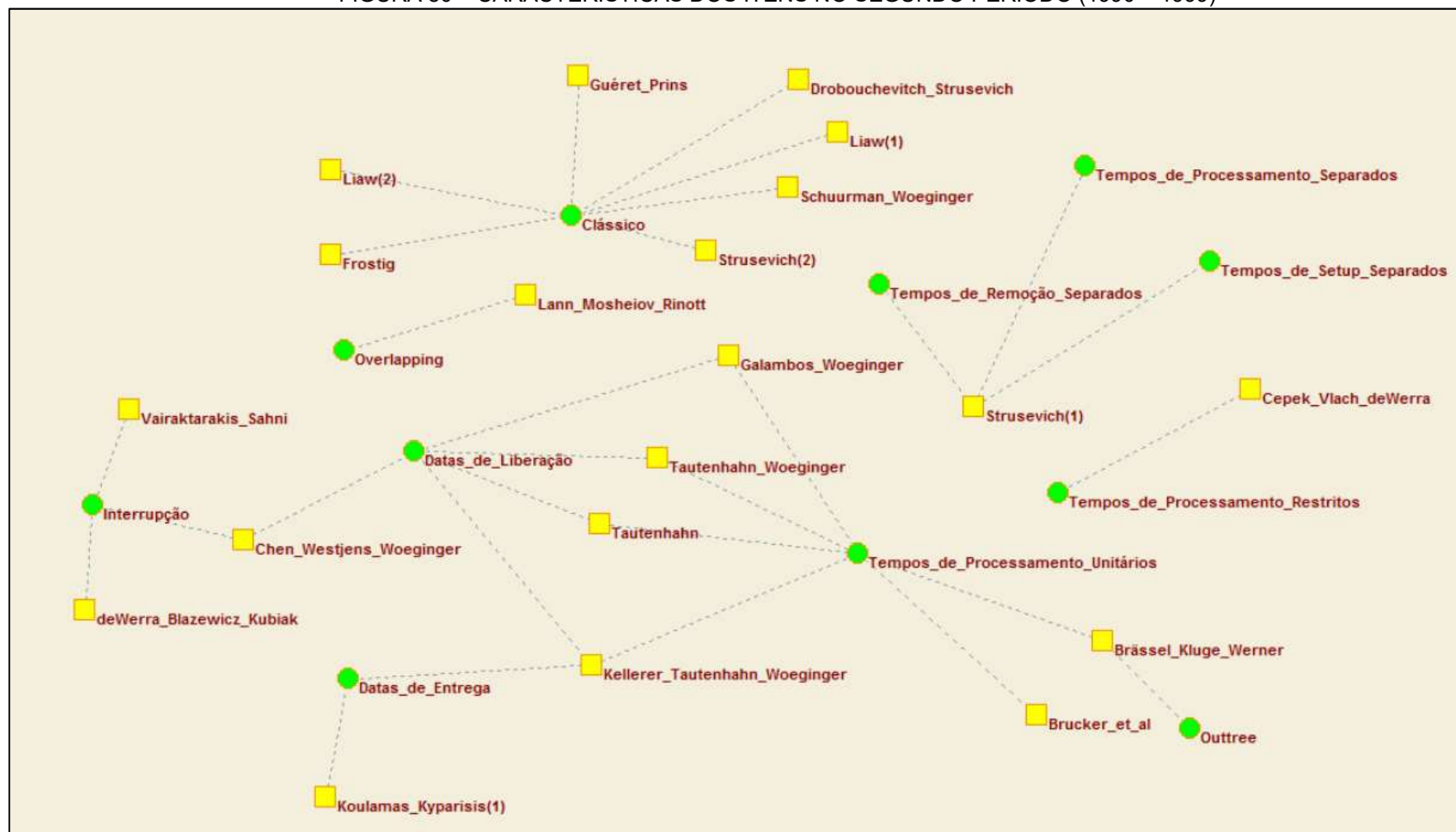
7.6.2 Segundo Período (1990 – 1999)

Este período é marcado pela prevalência do modelo clássico face ao modelo preemptivo e pela diversidade crescente das características estudadas é uma das mais profícuas no que concerne a novas características dos itens estudadas correlatas ao *Open Shop*. Dentre essas estão as datas de liberação, abordada em Chen, Vestjens e Woeginger (1997) e as datas de entrega, presente nos trabalhos de Kellerer, Tautenhahn e Woeginger (1995) e Koulamas e Kyparisis (1998). Em relação ao primeiro, os autores tratam de um modelo *on-line*, ou seja, as datas de liberação não são conhecidas à priori e dinâmico, visando à minimização do *makespan*.

Em relação aos últimos, Kellerer, Tautenhahn e Woeginger utilizam datas de entrega e tempos de execução unitários determinísticos e conhecidos *à priori*, visando à minimização do *lateness máximo* para um problema com m máquinas. Já Koulamas e Kyparisis, trata da questão das datas de entrega para o caso com duas máquinas e para o caso generalizado, ou seja, com m estações de trabalho.

A Figura 80 retrata esse período.

FIGURA 80 – CARACTERÍSTICAS DOS ITENS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2017).

7.6.3 Terceiro Período (2000 – 2009)

Nesse período se pode destacar a pouca quantidade de novas características dos itens. Dentre estas, se pode citar os modelos sem espera, apresentados em Lin, Lee e Pan (2008) e cenários resumíveis (*resumable scenarios*), tratados em Kubzin et al. (2006). Esta última característica apresentada ocorre quando uma operação não pode ser concluída antes de uma parada pré-determinada e obrigatória (como a hora do almoço), mas pode ser continuada após esse intervalo sem qualquer penalidade. Os autores tratam desse problema com o objetivo de minimizar o *makespan*.

Em relação ao *Open Shop* sem espera, os autores acima mencionados tratam dessa característica em uma aplicação que modela um problema correlato à construção de estradas, como se este fosse um *Open Shop*. Além desse caráter em que os itens são processados continuamente, tem-se as máquinas que são deslocadas ao longo dos setores da estrada, além destas serem dedicadas, isto é, elas só processam um tipo de operação.

Outro aspecto relevante a respeito da terceira década é a predominância do modelo clássico face às demais características contempladas. A Figura 81 traz a rede representativa desse período.

7.6.4 Quarto Período (2010 – 2015)

Este período é o que apresenta a maior diversidade no que diz respeito às características apresentadas, a despeito do período analisado ser menor do que o verificado nos demais estratos analisados. Há 17 características tratadas nesse período, algumas já outrora abordadas, como modelos sem espera e a temática das datas de entrega, mas algumas até então inexploradas, como a manutenção das estações de trabalho e os tempos de processamento difusos.

Em relação à primeira, está e tratada em Azadeh et al. (2015), que versa sobre um *Open Shop* flexível e multiobjetivo, visando à maximização da disponibilidade da máquina e à minimização do *makespan* e dos custos dos atrasos e adiantamentos, de maneira simultânea. Dentro dos temas abordados pelos autores, está a manutenção preventiva, pouco explorada nos modelos de Programação da Produção em geral.

Em relação à segunda, esta é estudada por Palacios et al. (2015). Os autores não apenas tratam dos tempos de processamento difusos, como também as datas de entrega são incertas. Os autores utilizam números difusos triangulares na modelagem dos tempos de processamento, enquanto as datas de entrega são modeladas a partir de uma função linear decrescente, que leva em conta as datas de entrega que são preferidas pelo cliente e aquelas em que algum atraso será incorrido.

Conforme observado nas últimas duas décadas, o *Open Shop* clássico tem maior atenção por parte da literatura do que as demais características dos itens, com oito estudos abordando essa temática.

A Figura 82 traz a rede que representa esse último excerto da análise correlata a essa métrica.

FONTE: O Autor (2017).

Em síntese, constata-se que tanto o *Open Shop* clássico como o preemptivo são as características mais estudadas nos artigos pertencentes à presente revisão. O caso preemptivo é comumente encontrado na literatura porque é mais fácil de solucionar que outras características, especialmente quando o critério de otimalidade é o *makespan*. Isso decorre devido à facilidade de se obter um *lower bound* para esse critério quando as preempções são permitidas (PINEDO, 2012). Outro critério que a preempção torna o problema mais facilmente solucionável é o *lateness* máximo.

Outrossim, destaca-se que se abrodou um grande número de características nas últimas quatro décadas. Entretanto, a maioria destas é pouco explorada, como os modelos sem espera, cenários resumíveis, entre outros.

7.7 CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE

Assim como na métrica anterior, dividiu-se o período analisado em quatro estratos temporais. Nas redes que se seguem, os quadrados amarelos representam os autores (e artigos), os círculos verdes os critérios estudados e a linha tracejada preta a ligação entre estes entes.

7.7.1 Primeiro Período (1976 – 1989)

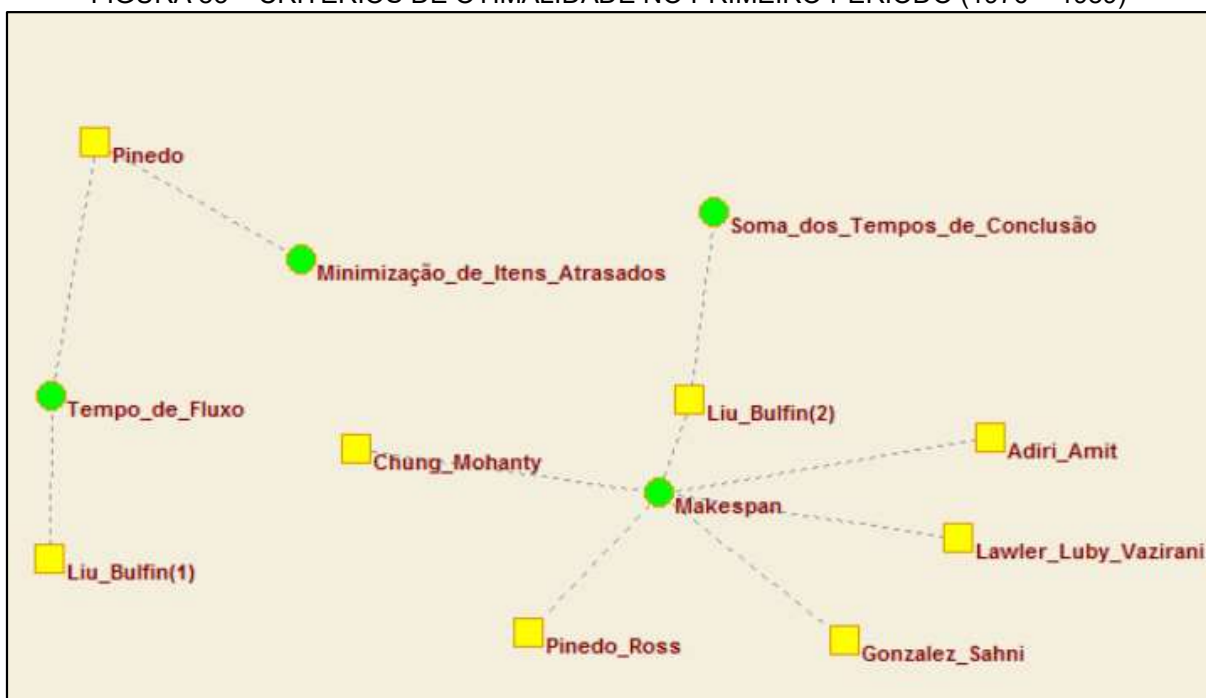
Dos 8 artigos pertencentes ao Primeiro Período, 6 deles versam sobre a minimização do *makespan*. Dentre estes se pode citar Adiri e Amit (1983), trabalha com esse objetivo em um *Open Shop* com duas máquinas e com tempos de processamento dependentes da rota de processamento (*route-dependent Open Shop*).

Em relação aos demais critérios analisados nesse período, tem-se o tempo de fluxo, tratado em Pinedo (1984), em um *Open Shop* estocástico com duas máquinas e n itens. Liu e Bulfin (1985) também versam sobre esse objetivo, mas a abordagem dos autores é voltada à temática da complexidade do modelo preemptivo dessa configuração produtiva.

Pinedo (1984) também avalia outro critério de otimalidade, que é o número de itens atrasados. O outro critério também contemplado nessa década é a soma dos tempos de conclusão, presente no trabalho de Liu e Bulfin (1987).

A Figura 83 traz a rede que traz os critérios de otimalidade estudados na primeira década de *Open Shop*.

FIGURA 83 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)



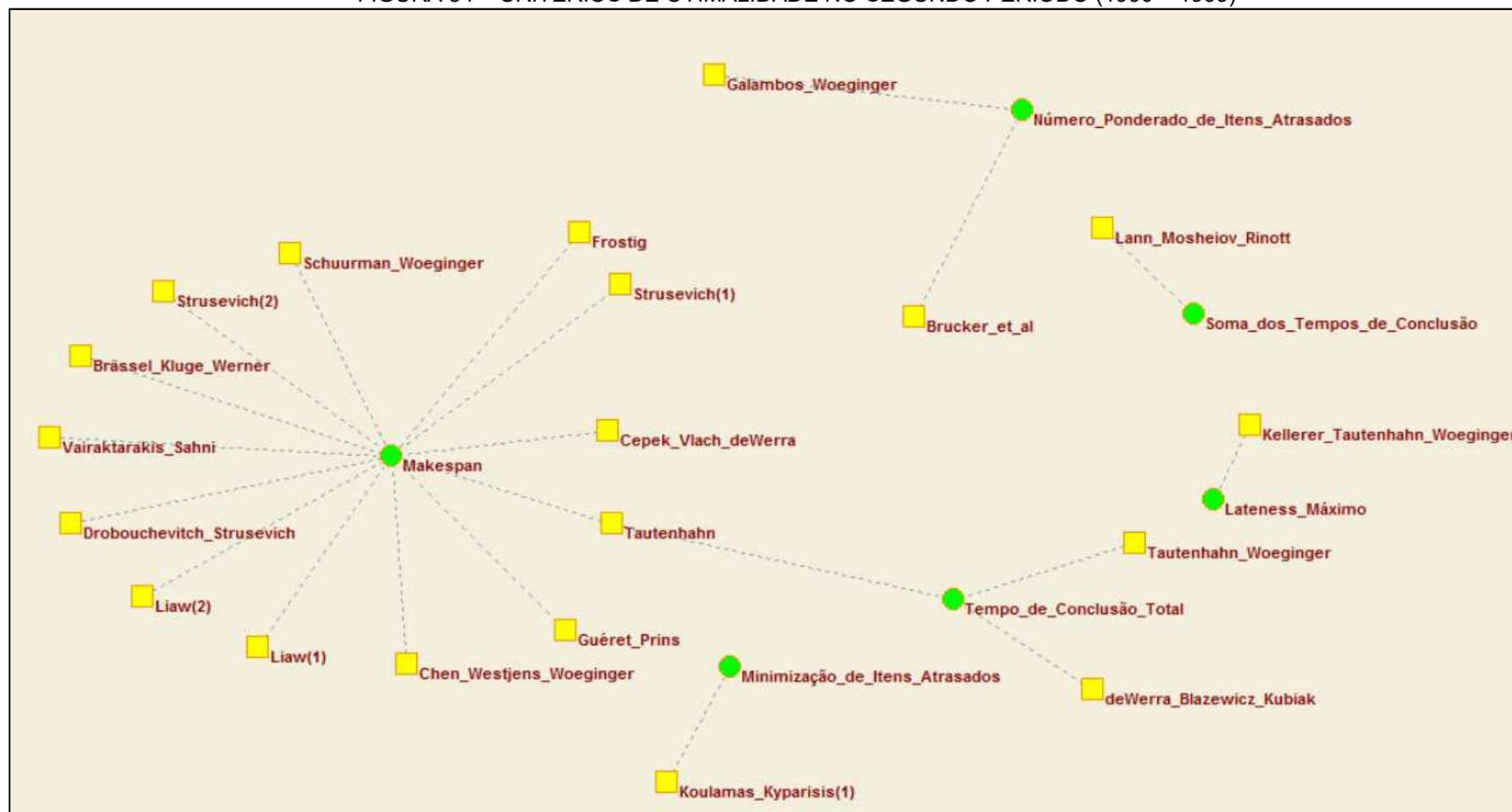
FONTE: O Autor (2017).

7.7.2 Segundo Período (1990 – 1999)

Esse período apresenta maior diversidade de critérios estudados, como o *lateness* máximo, abordado em Kellerer, Tautenhahn e Woeginger (1995) e número ponderado de itens atrasados, presente nos artigos de Galambos e Woeginger (1995) e Brucker et al. (1993). Entretanto a prevalência do *makespan* persiste, como se observa na Figura 84.

Em Brucker et al. (1993), tem-se um *Open Shop* com tempos de execução das operações unitários e com um número fixo de máquinas, otimizando o modelo por meio de um algoritmo de Programação Dinâmica. Já em Galambos e Woeginger (1995), trabalha-se com um *Open Shop* com duas máquinas, com datas de liberação e entrega e com tempos de execução das operações unitários.

FIGURA 84 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2017).

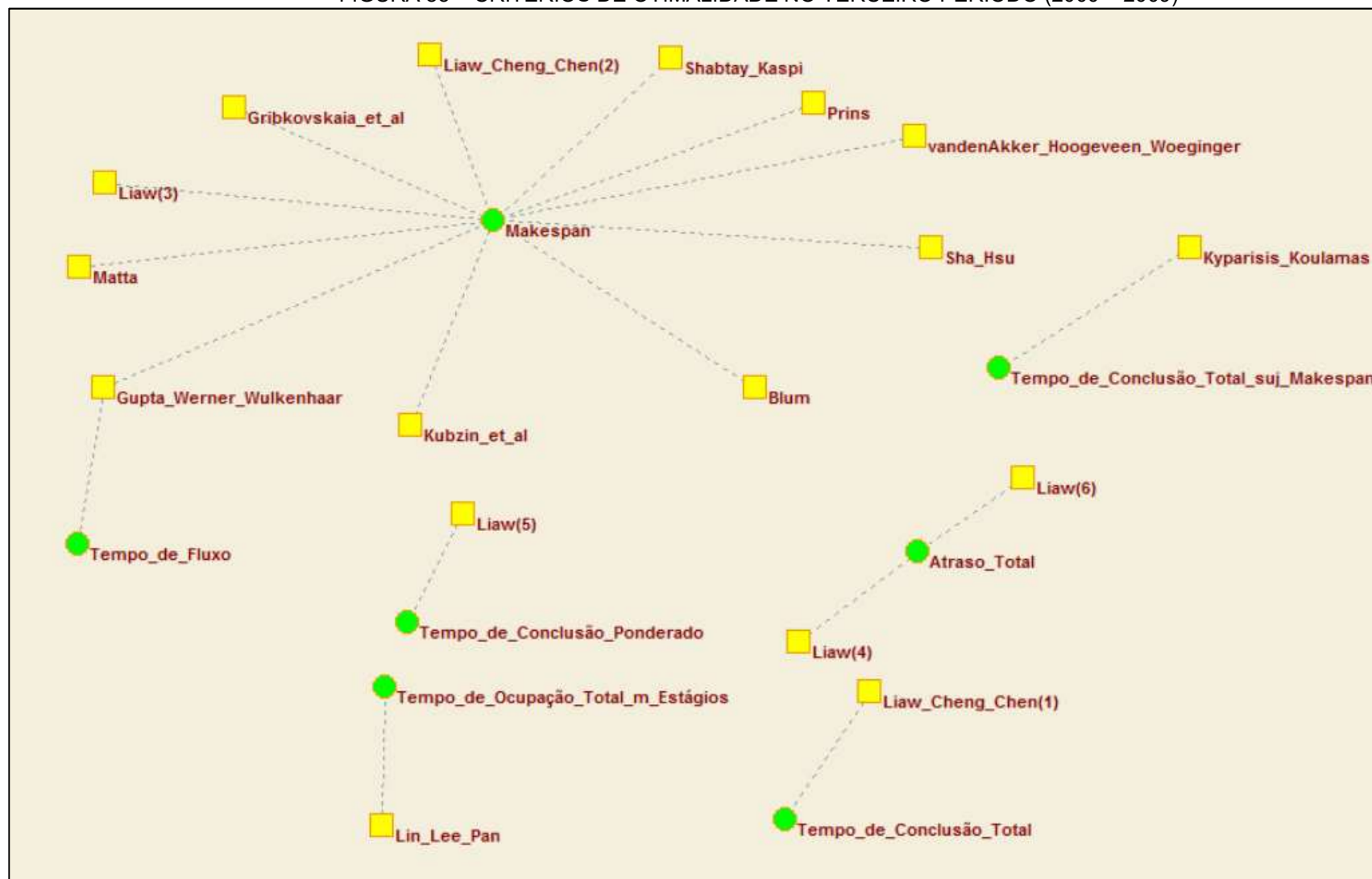
7.7.3 Terceiro Período (2000 – 2009)

Nesse período, assim como nos demais, a predominância do *makespan* persiste, ao passo que a diversidade de critérios se reduz. No que diz respeito aos demais critérios, se pode citar o atraso total, abordado em Liaw (2004) e Liaw (2005) e tempo de fluxo, presente em Gupta, Werner e Wulkenhaar (2003). No que diz respeito ao último, é necessário enfatizar que este artigo busca-se a otimização simultânea tanto do tempo de fluxo, como do *makespan*.

Outro estudo relevante desse período devido à sua peculiaridade e ineditismo no que tange ao ambiente estudado neste capítulo é o artigo de Kyparisis e Koulamas (2000). Neste, os autores trazem a hierarquia de objetivos, posto que a minimização do tempo de conclusão total está sujeita à minimização do *makespan*. Ou seja, aquela só ocorre quando da otimização desta. Não há, portanto, uma competição entre os critérios, mas uma relação de dependência entre eles.

Na Figura 85, tem-se a rede representativa do período, em que se apresentam os demais critérios de otimalidade, embora poucos, a esse estrato correlatos.

FIGURA 85 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)



FONTE: O Autor (2017).

7.7.4 Quarto Período (2010 – 2015)

Nesse período, há uma maior diversidade no que tange ao número de critérios estudados, se comparado com o verificado no estrato temporal anterior. Dentre os critérios pela primeira vez tratados quando dos artigos pertencentes ao escopo da presente revisão, tem-se soma de atrasos e adiantamentos, presente em Azadeh et al. (2015), que trabalha um modelo multiobjetivo, em que além dos atrasos e adiantamentos, versa sobre o *makespan* e a disponibilidade da máquina; a soma de tempos de conclusão quadráticos, em Zhang e Bai (2014), onde a variabilidade do tempo de processamento tem importância e onde quanto mais um item demora para ser concluído, maior o custo por unidade de tempo despendido.

Destaca-se também o trabalho de Lin e Cheng (2011), em que se visa à minimização do *lateness* máximo, o número ponderado de itens atrasados e tempo ponderado de conclusão total. O *Open Shop* pelos autores tratado faz considerações acerca da produção em lotes, sob a ótica de duas políticas: a centralizada, quando todas as estações de trabalho possuem a mesma estratégia para os lotes de itens; e descentralizada, quando cada máquina tem sua própria decisão acerca dos lotes.

A despeito da diversidade crescente, como mostra a Figura 86, o *makespan* é, por pronunciada margem, o critério de otimalidade mais estudado pelos autores.

FIGURA 86 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015)



FONTE: O Autor (2017).

Em suma, o *makespan* é amplamente estudado ao longo dos períodos analisadas por esta RSL. A explicação é a mesma que aquela mencionada no capítulo 5, em que faz-se referência à relação entre esse critério com o *throughput*, uma importante medida do desempenho fabril no mundo real.

Em relação aos demais critérios, como o número de itens atrasados ou considerações correlatas à disponibilidade das máquinas, é ainda pouco explorada. Além disso, outro aspecto a ser mais bem estudado em trabalho e pesquisa futuras repousa em análises multiobjetivos, pouco verificadas no *Open Shop*, se comparado aos demais ambientes.

7.8 TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS

A análise dessa métrica também será feita em quatro estratos temporais. As redes apresentam os tipos de métodos (exato, heurístico, meta-heurístico, híbrido e não-especificado) e os autores e, por extensão, os artigos que utilizaram tais tipos de métodos em seus estudos.

7.8.1 Primeiro Período (1976 – 1989)

No Primeiro Período existe um equilíbrio entre a utilização de metodologias resolutivas exatas e heurísticas. Há também artigos cujo procedimento resolutivo não é especificado.

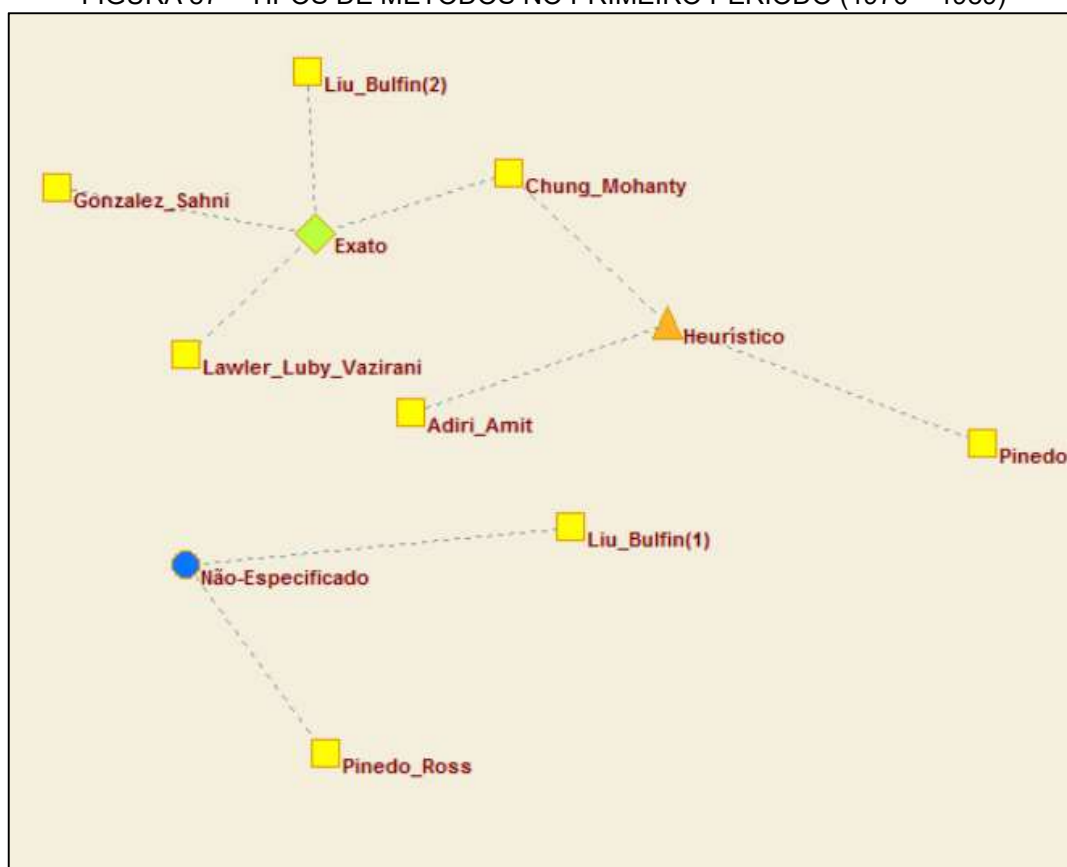
Em relação aos métodos exatos, destaca-se o trabalho de Lawler, Luby e Vazirani (1982) que trabalha com esse tipo de método na resolução de um *Open Shop* com máquinas paralelas, visando à minimização do *makespan*, em problemas com duas máquinas paralelas em cada operação.

No que concerne à utilização de métodos heurísticos, se pode citar o trabalho de Pinedo (1984), que os emprega na resolução de *Open Shops* estocásticos, com a finalidade de minimizar o tempo de fluxo e o número de itens atrasados, em problemas com duas máquinas. A faceta estocástica da modelagem repousa na definição dos tempos de processamento dos itens, que variáveis aleatória exponencialmente distribuídas.

Os artigos de Liu e Bulfin (1985) e Pinedo e Ross (1982) não apresentam ao longo de seus estudos o tipo de método resolutivo por eles utilizado. No tangente ao primeiro, tem-se uma preocupação maior em apresentar a complexidade dos modelos de *Open Shop* com preempção. Em relação ao segundo, os autores tratam de modelos clássicos e também dos estocásticos, ponderando acerca dos critérios de otimalidade utilizados e abordando diferentes adaptações do problema, como a utilização de operações idênticas em máquinas com velocidades diferentes, em problemas com duas máquinas.

A Figura 87 traz o retrato desse período em termos dos tipos de métodos resolativos empregados pelos autores.

FIGURA 87 – TIPOS DE MÉTODOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)



FONTE: O Autor (2017).

7.8.2 Segundo Período (1990 – 1999)

Esse período é marcado pelo número considerável de artigos que usam tanto métodos heurísticos como exatos, com dez artigos em que faz-se uso do primeiro, enquanto sete empregam o último. Dentre os trabalhos em que se lança mão de

heurísticas, destaca-se aquele de De Werra, Balzewicz e Kubiak (1991), que a utiliza na resolução de um *Open Shop* preemptivo e com restrições devido à disponibilidade de um recurso não renovável.

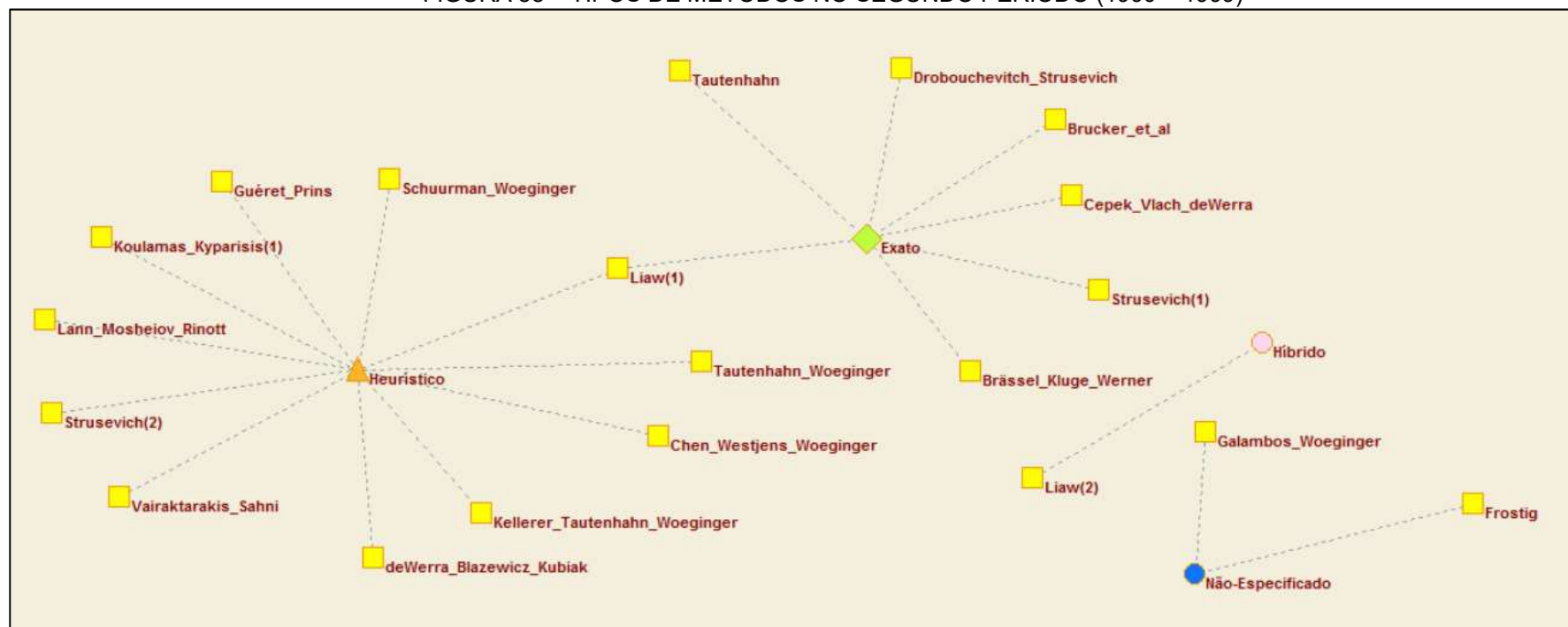
Em relação aos estudos que contem métodos exatos, se pode citar aquele de Strusevich (1993), que os utiliza na resolução de um problema em que os tempos de preparação, processamento e remoção dos itens são considerados de maneira separada. O ambiente estudado possui duas máquinas e objetivo do modelo proposto é minimizar o *makespan*.

Esse estrato traz a primeira hibridação no que concerne ao *Open Shop*. Em Liaw (1999), combina-se uma heurística a uma meta-heurística, testando-a em dois conjuntos de problemas: o primeiro é gerado aleatoriamente pelos autores com instâncias de até trinta máquinas e trinta itens. Compara-se o resultado obtido com um *lower bound* conhecido para o *makespan* e os resultados são próximos ou idênticos a esse limite inferior.

O segundo é proveniente das instâncias difíceis de Taillard (1993), com problemas de até 20 itens e 20 máquinas. A hibridação proposta pelos autores encontra o ótimo em 44 dos 60 problemas testados, o que consolida a eficiência desta.

A Figura 88 traz a rede representativa desse período no que tange à métrica estudada.

FIGURA 88 – TIPOS DE MÉTODOS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2017).

7.8.3 Terceiro Período (2000 – 2009)

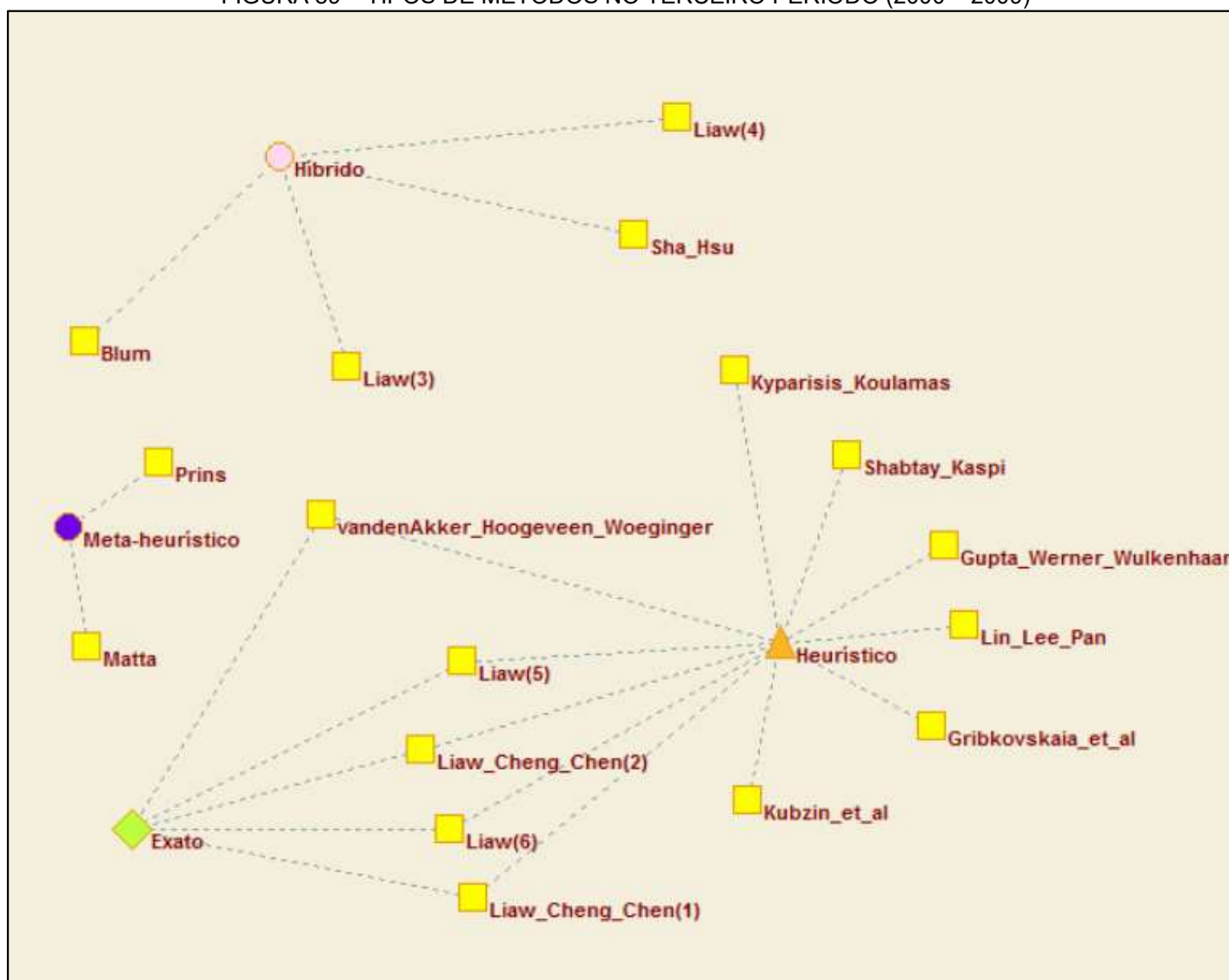
Nesse período o uso de métodos heurísticos é mais frequente do que o verificado com os demais tipos de procedimentos resolutivos. Dos 17 artigos correlatos a esse estrato, 10 aplicam em algum momento esse método resolutivo. Destes, destaca-se o trabalho de Shabtay e Kaspi (2006), que resolvem um *Open Shop* em que os tempos de processamento das operações é uma função convexa decrescente um recurso não renovável comum e limitado. O objetivo aqui é determinar a sequência ótima em cada máquina e alocação ótima desse recurso em cada operação a fim de minimizar o *makespan*.

Esse terceiro período também se notabiliza pela diminuição da importância relativa dos métodos exatos, se comparado com o que fora durante dois estratos temporais. Destes cinco artigos que empregaram em algum momento esse tipo de método, se pode citar o estudo de Liaw, Cheng e Chen (2002) em que se utiliza o método exato na resolução de um *Open Shop* com restrição de precedência dependente da máquina. O método exato é utilizado em pequenas instâncias, com até 7 itens e 7 máquinas.

Outros pontos relevantes desse período a ser destacados é o aumento do uso de hibridações e as primeiras ocorrências no que concerne aos artigos pertencentes ao escopo da presente revisão do uso de meta-heurísticas puras no processo resolutivo dos problemas atrelados a esse ambiente fabril. Em relação ao primeiro, destaca-se o artigo de Blum (2005), em que se combina duas meta-heurísticas em um *Open Shop* clássico, com o propósito de se minimizar o *makespan*. No tangente ao último, destaca-se o artigo de Matta (2009), que utiliza uma meta-heurística na resolução de um problema pouco tratado na literatura: o *Open Shop* com múltiplos processadores e proporcional, onde os tempos de processamento de um dado item são os mesmos em cada estação de trabalho.

A Figura 89 apresenta a rede em que faz-se a relação dos autores com os tipos de métodos resolutivos por eles empregados.

FIGURA 89 – TIPOS DE MÉTODOS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)



FONTE: O Autor (2017).

7.8.4 Quarto Período (2010 – 2015)

Nesse período a prevalência das heurísticas se comparado aos outros tipos de métodos persiste. Dos 25 artigos desse período, 13 deles utilizam métodos heurísticos em algum momento de seus estudos. Destes, destaca-se o artigo de Gohareh, Karimi e Khademian (2014), que utilizam tal tipo de método na resolução de um *Open Shop* estocástico, visando à minimização da soma ponderada de atrasos e avanços, até então inédito para esse ambiente fabril com dados dessa natureza.

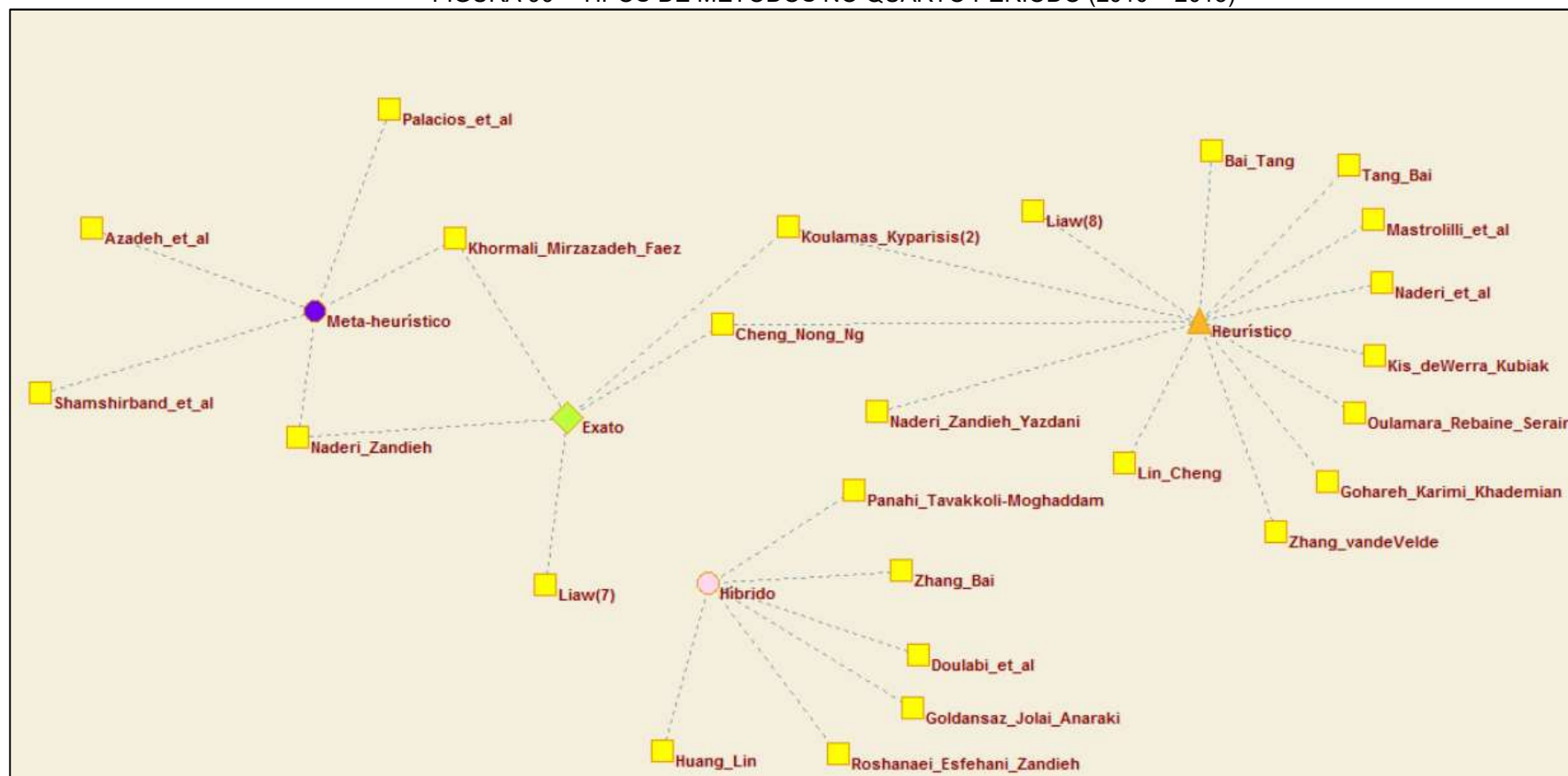
Os métodos híbridos aumentam no que tange à quantidade de artigos em que faz-se uso desse tipo de processo resolutivo, se comparado ao encontrado na década passada. Dentre os artigos que empregaram tal metodologia, tem-se o de Huang e Lin, em que se combina uma heurística a uma meta-heurística, em um modelo clássico de *Open Shop* com o objetivo de minimizar o *makespan*.

As meta-heurísticas puras aparecem em 20% dos artigos avaliados nesse período. Dentre estes, se pode citar o trabalho de Shamshirband et al. (2015), em que se trata da temática da manutenção das máquinas. O objetivo do trabalho proposto pelos autores é a minimização do *makespan*.

Os métodos exatos também aparecem na mesma proporção verificada para as meta-heurísticas. Em relação ao uso desse tipo de método, destaca-se o artigo de Koulamas e Kyparisis (2015), que aplica um método exato na resolução de um problema com três máquinas e proporcional.

Apresenta-se a rede representativa desse estrato temporal na Figura 90 .

FIGURA 90 – TIPOS DE MÉTODOS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015)



FONTE: O Autor (2017).

Em suma, finda a análise período a período dessa métrica, constata-se a predominância do método heurísticos face aos demais procedimentos resolutivos. Se pode explicar tal fato sob a ótica do baixo tempo computacional que a implementação de tal tipo de método leva.

Outro aspecto a ser abordado é o crescimento da hibridação no *Open Shop*. Esta visa a enfatizar e potencializar as forças dos métodos que são combinados e dirimir suas fraquezas, seja na dificuldade de implementação ou no desempenho algorítmico.

No tangente às lacunas encontradas na literatura desse ambiente fabril, se pode explorar com maior frequência o uso de meta-heurísticas, posto que estas resolvem os problemas com tempos relativamente baixos e com soluções consideravelmente melhores se comparado às heurísticas, assim como a exploração de métodos exatos pode ser mais bem utilizada, devido ao aumento crescente da capacidade de processamento de computadores e aplicativos de otimização.

7.9 MÉTODOS RESOLUTIVOS

Assim como o verificado na análise das métricas características dos itens, critérios de otimalidade e tipos de métodos resolutivos, dividiu-se a análise desta em quatro estratos temporais. A diferença é que nas redes nessa seção apresentadas tem-se o tipo de método resolutivo associado ao método resolutivo propriamente dito.

7.9.1 Primeiro Período (1976 – 1989)

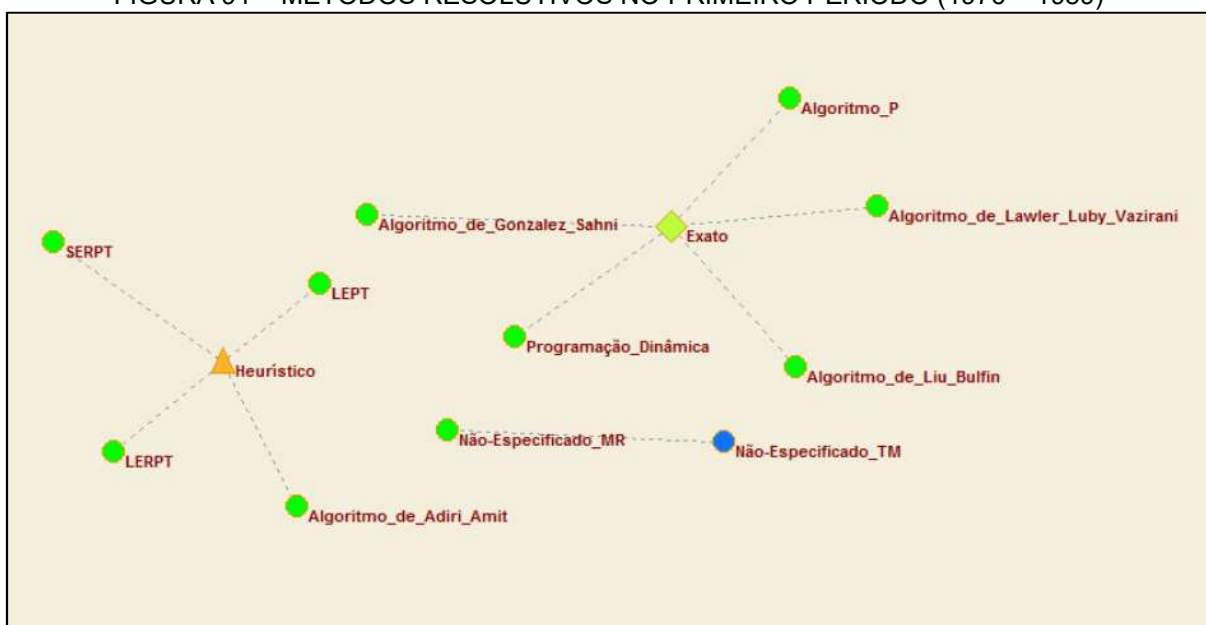
Esse período é marcada pela utilização dos métodos exatos e heurísticos. Dentre os exatos, destacam-se os artigos de Gonzalez e Sahni (1976) e Chung e Mohanty (1988). Os primeiros utilizam dois algoritmos autorais (Gonzalez e Sahni e P) na resolução de modelos clássicos e preemptivos de *Open Shop*. O último utiliza Programação Dinâmica em um modelo preemptivo e estocástico com duas máquinas.

Em relação às heurísticas, tem-se como exemplo a heurística Maior Tempo Esperado de Processamento Restante (LERPT – *Longest Expected Remaining Processing Time*), utilizada em Pinedo (1984), em um problema com duas máquinas,

em que se prioriza, se possível, os itens que ainda não foram processados na outra máquina, de acordo com o tempo de processamento restante esperado, posto que o modelo estudado pelo autor é estocástico.

A Figura 91 traz a rede que representa essa década no que concerne aos métodos resolutivos nesse estrato temporal empregados.

FIGURA 91 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)

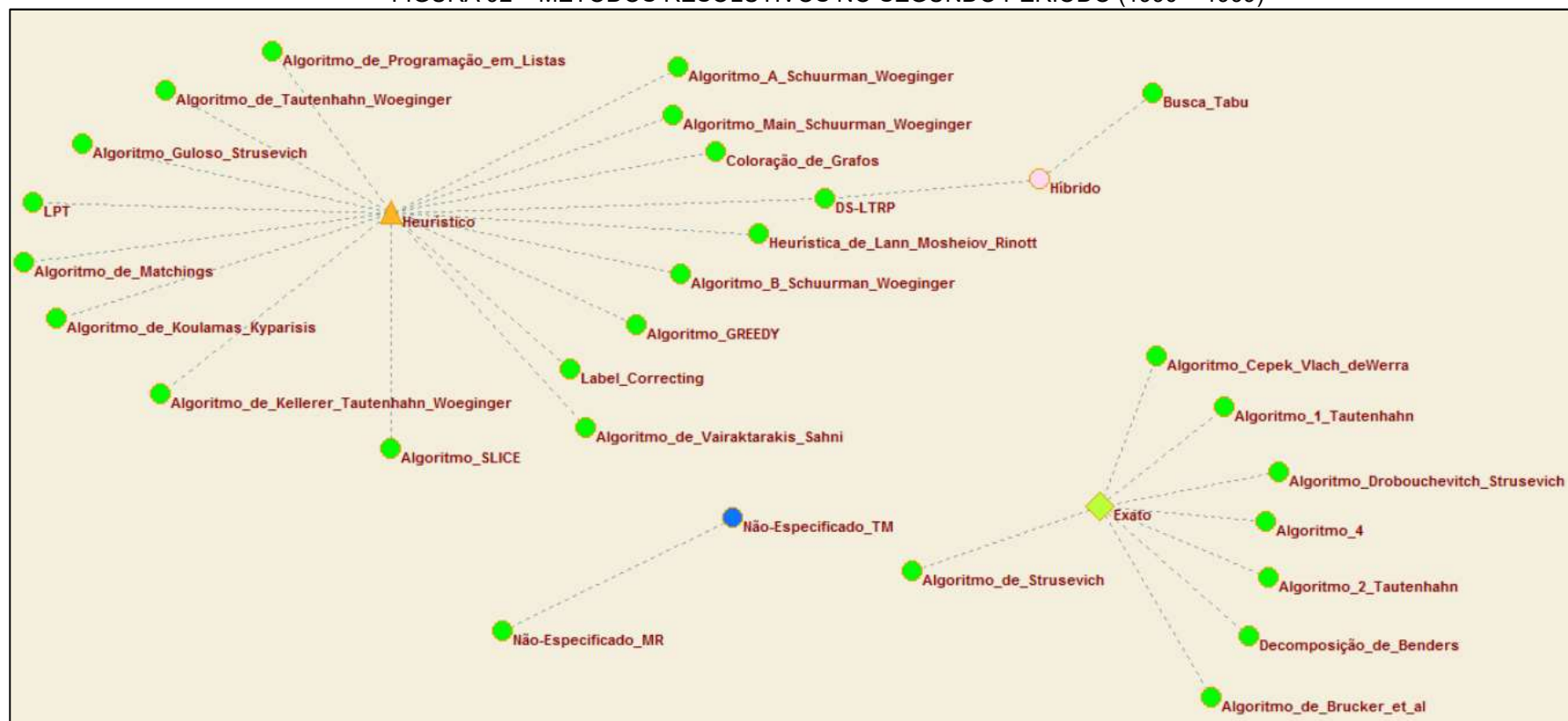


FONTE: O Autor (2017).

7.9.2 Segundo Período (1990 – 1999)

Esse período tem como característica marcante a ampla gama de heurísticas utilizadas nos artigos analisados, como mostra a Figura 92. Dos 28 métodos resolutivos aplicados nesse estrato, 19 são heurísticos e a maioria destes, são autorais. Dentre estes métodos o algoritmo autoral apresentado em Vairaktarakis e Sahni (1995), que se propõe a resolver problemas preemptivos visando à minimização do *makespan*. Trata-se de um refinamento do Algoritmo de Gonzalez e Sahni, posto que os autores desse refinamento eliminam a inserção de tarefas fictícias (*dummy tasks*) assim como o tempo despendido para alocações fictícias (*dummy assignments*).

FIGURA 92 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2017).

7.9.3 Terceiro Período (2000 – 2009)

Nesse período há uma quantidade considerável de diferentes heurísticas utilizadas se comparado com os demais métodos resolutivos, sendo a maioria destas composta por algoritmos autorais. Outro aspecto correlato à aplicação delas repousa na frequência com que se emprega mais de uma heurística por artigo, o que contribui para o elevado número destes procedimentos resolutivos. Dentre os trabalhos em que faz-se uso de heurísticas, destaca-se aquele de Gupta, Werner e Wulkenhaar (2003), que apresentam três heurísticas de inserção autorais, a saber, a ISH1, ISH2 e ISH3). O modelo tratado pelos autores é um *Open Shop* clássico em que o *makespan* é o primeiro critério a ser otimizado e o critério secundário pode ser a minimização do tempo de fluxo, ou a minimização do tempo ponderado de fluxo, ou o tempo total de atraso ponderado.

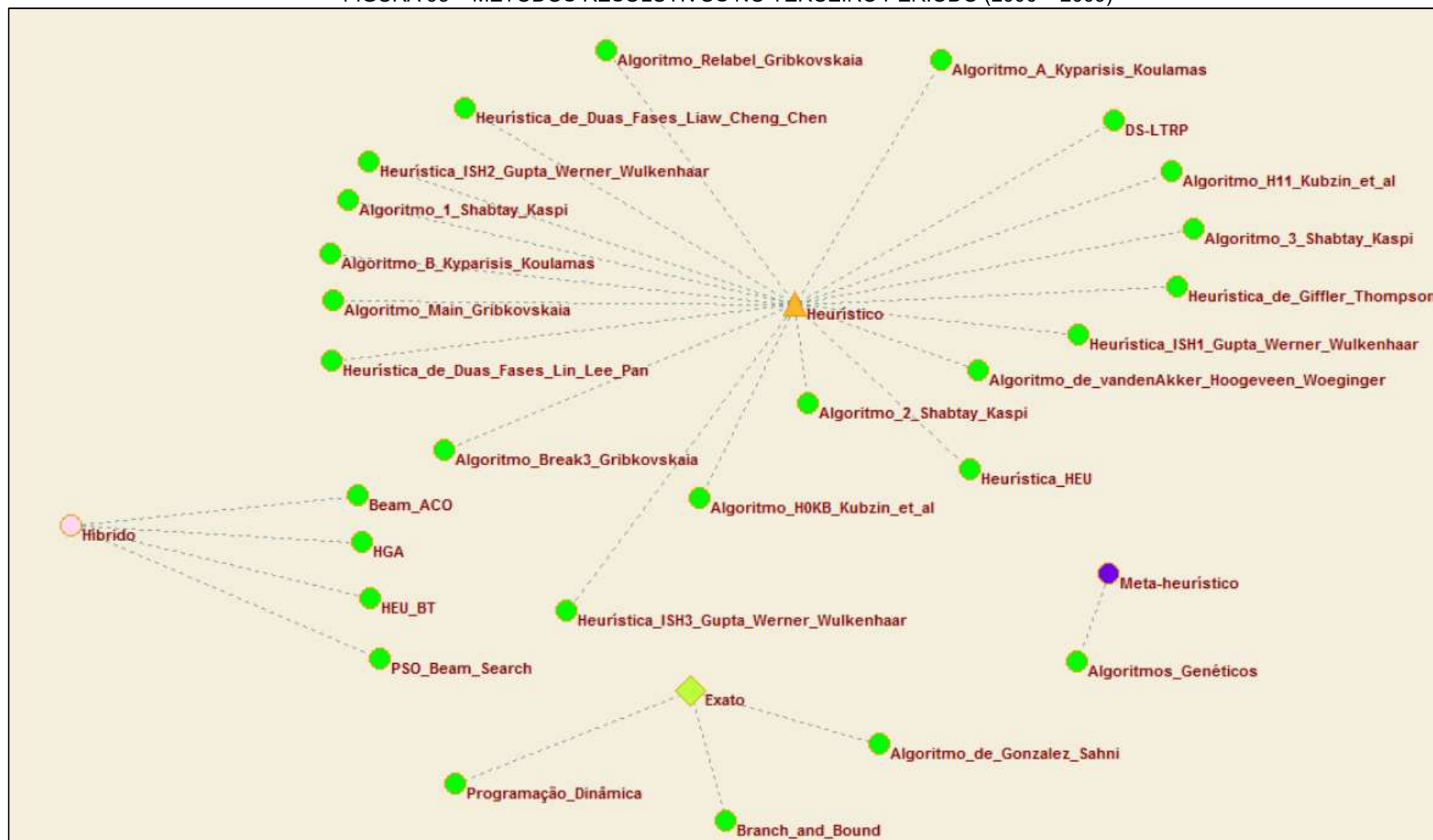
Nesse período observa-se também o aumento do emprego de métodos híbridos, como ocorre no artigo de Blum (2005) em que se combina a Busca em Feixe (BS – *Beam Search*) com a ACO e como é verificado também no artigo de Sha e Hsu (2008), em que se hibridiza PSO e BS.

Em Blum, o algoritmo por ele proposto, intitulado Beam-ACO-OSS pode ser considerado o estado-da-arte no que concerne a métodos resolutivos, posto que esse algoritmo é o primeiro a resolver todas as instâncias de Taillard à otimalidade. Além disso, o método melhorou as melhores soluções conhecidas das duras instâncias de Brucker et al. e de Guéret e Prins.

Em Sha e Hsu, o algoritmo dos autores, intitulado como “PSO-mP-ASG2 (Geração de Programações Ativas Modificadas e Parametrizadas) + BS” melhora os resultados de Blum para as duras instâncias supracitadas.

Na Figura 93 apresenta-se a rede que traz os métodos resolutivos utilizados no Terceiro Período.

FIGURA 93 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)



FONTE: O Autor (2017).

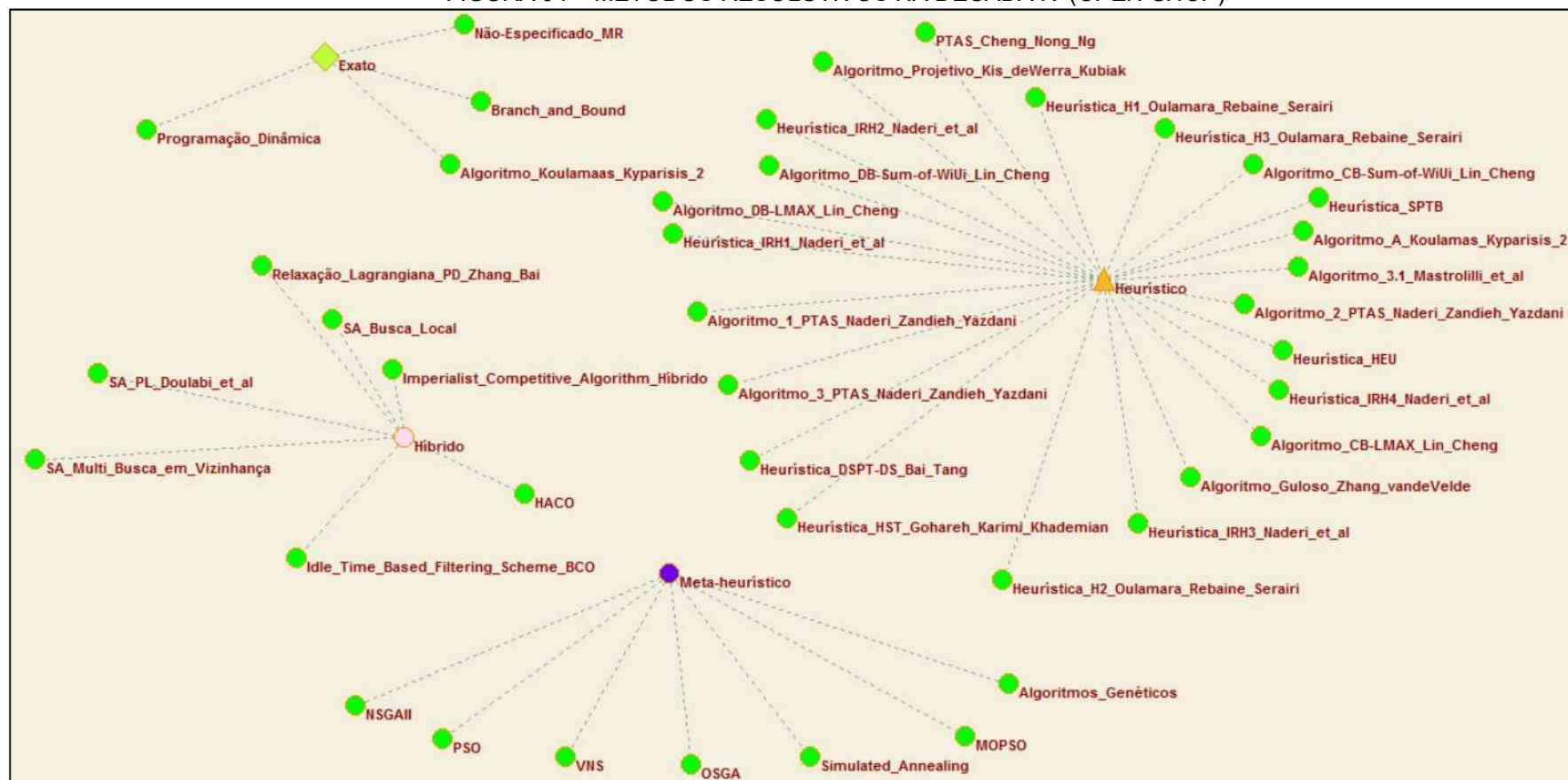
7.9.4 Quarto Período (2010 – 2015)

Nesse estrato, a proeminência das heurísticas em comparação aos demais métodos persiste, assim como a forte presença de métodos autorais, conforme observado nas décadas anteriores. Destas, se pode citar as três heurísticas utilizadas em Oulamara, Rebaine e Serairi (2013), a saber, H1, H2 e H3 de Oulamara_Rebaine_Serairi), utilizadas na resolução de *Open Shop* com duas máquinas e com restrição de recursos. No contexto do estudo dos autores, a fim de ser executado, um item requer *à priori*, para a sua preparação por um determinado período de tempo, uma série de recursos que não pode exceder à capacidade desta. Então, o item segue para a fase de execução enquanto os recursos alocados a ele tornam-se novamente disponíveis. O objetivo dos autores é minimizar o *makespan*

No tangente às meta-heurísticas utilizadas nesse , observa-se um aumento no uso destas, dentre as quais se pode citar o Algoritmo Eletromagnético, empregado em Naderi et al. (2011) e o PSO, encontrado em Palacios et al. (2015).

Em relação aos métodos híbridos, destaca-se o artigo de Goldansaz et al. (2013), em que se emprega o inaudito Algoritmo Competitivo Imperialista (ICA – *Imperialist Competitive Algorithm*), combinado com operadores genéticos advindos dos Algoritmos Genéticos.

A Figura 94 retrata a rede representativa do último excerto da análise relativa à essa métrica.

FIGURA 94 – MÉTODOS RESOLUTIVOS NA DÉCADA IV (*OPEN SHOP*)

FONTE: O Autor (2017).

Em resumo, constata-se ao fim da análise a existência de diversos métodos resolutivos, especialmente heurísticas, utilizadas na resolução de problemas de *Open Shop*. Observa-se também a expansão correlata ao emprego de meta-heurísticas e de hibridações no processo resolutivos dos problemas respectivos a essa configuração produtiva.

Em termos de pontos a ser explorados em trabalho e pesquisa futuras, há pouco a ser feito no tangente à expansão do número de métodos resolutivos. Contudo, há muito a ser explorado no que diz respeito à utilização desses métodos existentes em modelos de *Open Shop* com diferentes características dos itens e, ou, critérios de otimalidade, abordados.

7.10 PERIÓDICOS

Nas redes concernentes a essa métrica a ser apresentadas na subseções subsequentes, os quadrados amarelos simbolizam os autores e artigos, enquanto os círculos verdes representam os periódicos de alto impacto em que esses estudos foram publicados. Assim como as demais métricas que utilizaram a representação de redes, fragmentou-se a análise desta em quatro estratos temporais.

7.10.1 Primeiro Período (1976 – 1989)

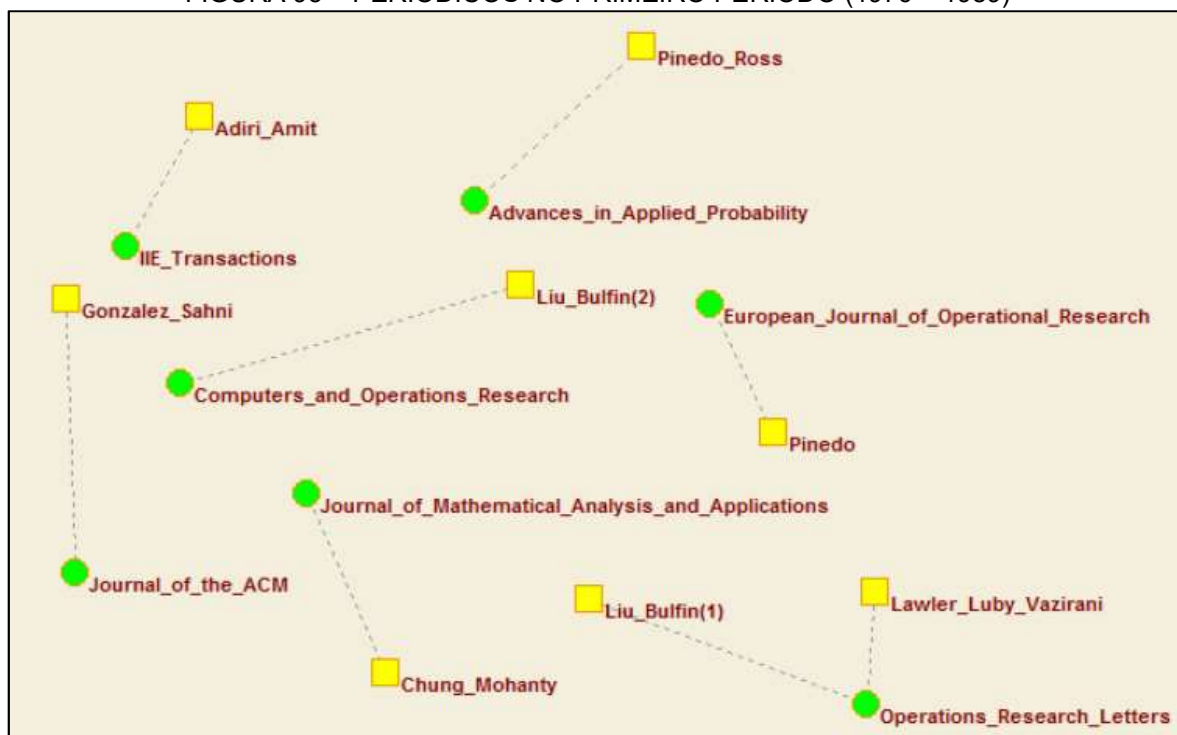
Nessa década, há poucos artigos publicados correlatos ao *Open Shop*. Dos 70 artigos pertencentes ao escopo desta revisão, apenas 8 estão aqui categorizados. Nesse contexto, há sete periódicos em que estes artigos foram publicados. Destaca-se, sob esse prisma, a *Operations Research Letters*, com dois estudos nela publicados.

Dentre os autores destacam-se Liu, Bulfin e Pinedo, que foram autores e co-autores em mais de um artigo. Liu e Bulfin escreveram, de forma conjunta, dois artigos. Em Liu e Bulfin (1985), trata-se da temática da complexidade de *Open Shops* preemptivos, publicado na *Operations Research Letters*, enquanto em Liu e Bulfin (1987), publicado na *Computers and Operations Research*, se estuda os problemas ordenados.

Em relação a Pinedo, este importante pesquisador dentro da área da Programação da Produção, assim como os autores supracitados, tem dois artigos publicados correlatos a esse período. Em Pinedo e Ross (1982), publicado na *Advances in Applied Probability* faz-se considerações acerca do *Open Shop* estocástico, com a finalidade de minimizar o *makespan* esperado, enquanto em Pinedo (1984), publicado na EJOR, também se aborda a faceta estocástica do problema, mas visando à minimização do tempo de fluxo e do número de itens atrasados.

A Figura 95 apresenta a rede que contém os autores e periódicos concernentes ao Primeiro Período.

FIGURA 95 – PERIÓDICOS NO PRIMEIRO PERÍODO (1976 – 1989)



FONTE: O Autor (2017).

7.10.2 Segundo Período (1990 – 1999)

Nesse período, o número de artigos mais que duplica, posto que há 20 artigos a essa década relacionados. No entanto, o número de periódicos sofre um pequeno aumento, com 8 periódicos aqui apresentados. Desses periódicos, destaca-se novamente a *Operations Research Letters*, com 6 dos 20 estudos nela publicados.

Dentre os autores, destaca-se Woeginger, que é co-autor de 20% das publicações desse período.

Em Galambos e Woeginger (1995), publicado *Mathematical Methods of Operations Research*, trabalha-se com *Open Shops* com tempos de execução das operações unitários e datas de liberação, visando à minimização do número ponderado de itens atrasados, utilizando-se para tal otimização um algoritmo autoral, com resolução em tempo polinomial.

Em Kellerer, Tautenhahn e Woeginger (1995), publicado na *Naval Research Logistics*, também contem tempos de execução das operações unitários e datas de liberação e, adiciona-se a essas características, as datas de entrega. O objetivo desse trabalho também é diverso daquele apresentado no artigo anterior, tratando-se nesse caso da minimização do *lateness* máximo.

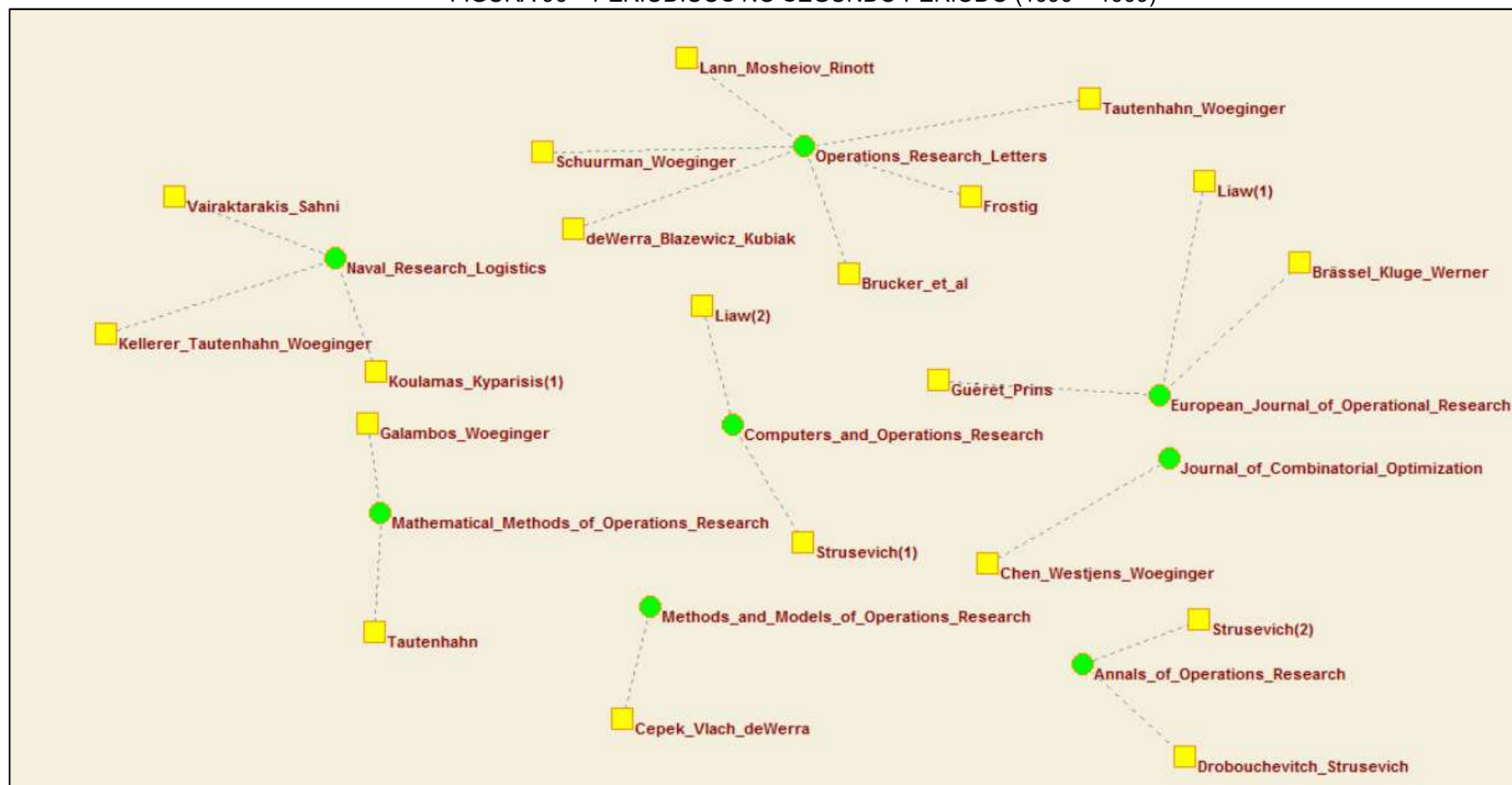
Em Chen, Vestjens e Woeginger (1997), publicado no *Journal of Combinatorial Optimization*, os autores estudam um *Open Shop on-line* e dinâmico, com duas máquinas e datas de liberação, visando à minimização do *makespan*.

Em Tautenhahn e Woeginger (1997), publicado na *Operations Research Letters*, trabalha-se novamente com os tempos de execução das operações unitários e as datas de liberação, mas dessa vez com o objetivo de minimizar o tempo de conclusão total, utilizando-se um algoritmo autoral baseado em Programação Dinâmica.

Em Schuurman e Woeginger (1999), publicado na *Operations Research Letters*, trabalha com o *Open Shop* com máquinas paralelas, propondo para a resolução deste problema algoritmos autorais e heurísticos, visando à minimização do *makespan*.

A Figura 96 traz a rede representativa desse período.

FIGURA 96 – PERIÓDICOS NO SEGUNDO PERÍODO (1990 – 1999)



FONTE: O Autor (2017).

7.10.3 Terceiro Período (2000 – 2009)

Nesse período ocorre uma pequena retração no número de artigos publicados, com 17 trabalhos aqui categorizados. Em relação aos periódicos, há também uma ligeira queda no número destes, retornando à quantidade verificada na primeira década. Nesse tocante, destaca-se a *Computers and Operations Research* com 7 dos 17 artigos desse período nela publicados.

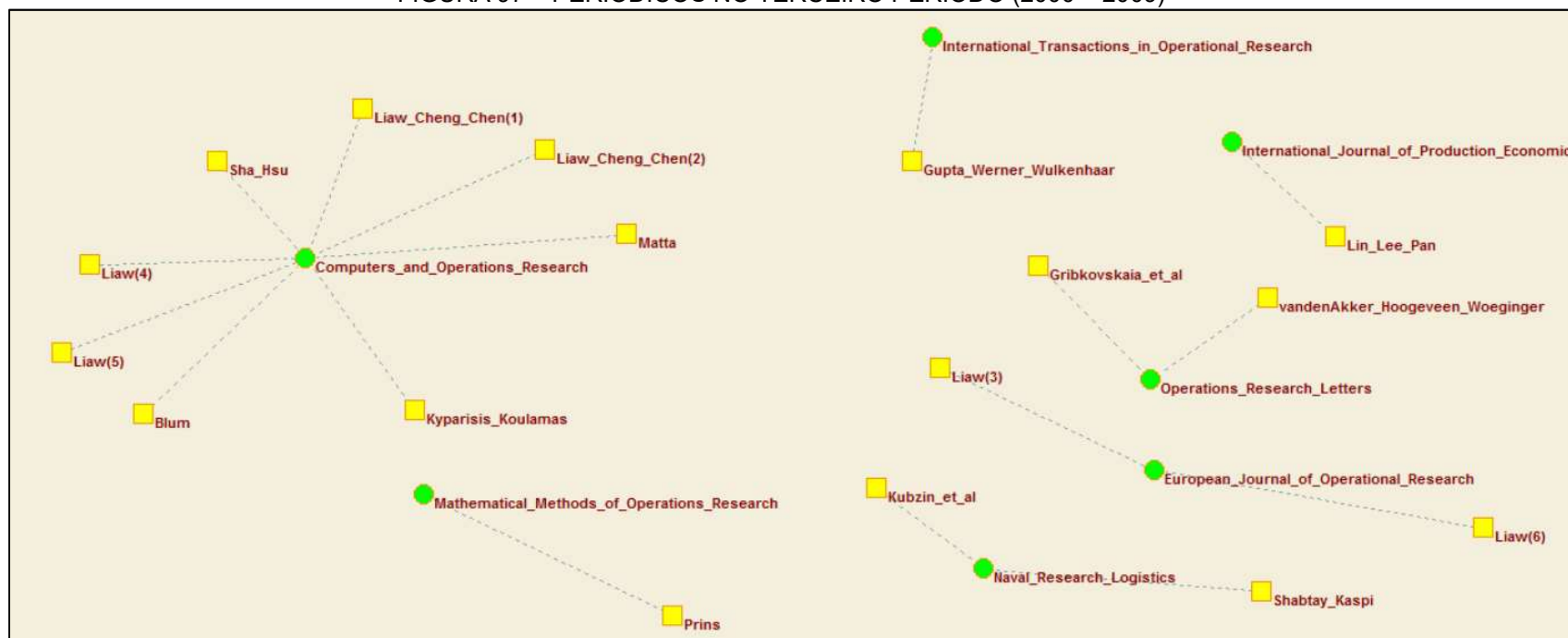
Dentre os autores, destaca-se Liaw, que foi autor ou co-autor de 6 dos 17 artigos. Em Liaw (2000), publicado na EJOR, o autor aborda o problema clássico de *Open Shop* visando à minimização do *makespan*, utilizando uma metodologia híbrida de resolução, combinando duas meta-heurísticas, a Busca Tabu e os Algoritmos Genéticos.

Em Liaw, Cheng e Chen (2002), publicado na *Computers and Operations Research* faz-se uso de métodos heurísticos autorais e exatos (*Branch and Bound*) na resolução de um *Open Shop* com restrições de precedência dependentes da máquina, visando à minimização do tempo de conclusão total.

Em Liaw (2003), publicado na *Computers and Operations Research*, estuda-se o *Open Shop* preemptivo com duas máquinas, visando à minimização do atraso total, com o auxílio da hibridação entre uma heurística autoral e a Busca Tabu. Em Liaw (2004), também publicado na *Computers and Operations Research* utiliza-se para um problema com as mesmas características que o tratado em Liaw (2003), dois métodos resolutivos, um exato (Programação Dinâmica) e uma heurística autoral, visando à minimização do tempo de conclusão total. Em Liaw, Cheng e Chen (2005), também publicado na *Computers and Operations Research*, trabalha com um modelo de *Open Shop* sem espera, visando à minimização do *makespan*, com duas máquinas, utilizando para tal uma heurística autoral em duas fases e o *Branch and Bound*.

Em Liaw (2005), publicado na EJOR, o autor trabalha com um modelo preemptivo, visando à minimização do atraso total, utilizando uma heurística autoral e o *Branch and Bound* no processo resolutivo. A Figura 97 retrata esse período.

FIGURA 97 – PERIÓDICOS NO TERCEIRO PERÍODO (2000 – 2009)



FONTE: O Autor (2017).

7.10.4 Quarto Período (2010 – 2015)

Esse período é aquele em que há o maior número de artigos publicados pertencentes à revisão (25), bem como é o período com o maior número de periódicos (13). Dentre esses periódicos, destaca-se o *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, com quatro estudos nele publicados.

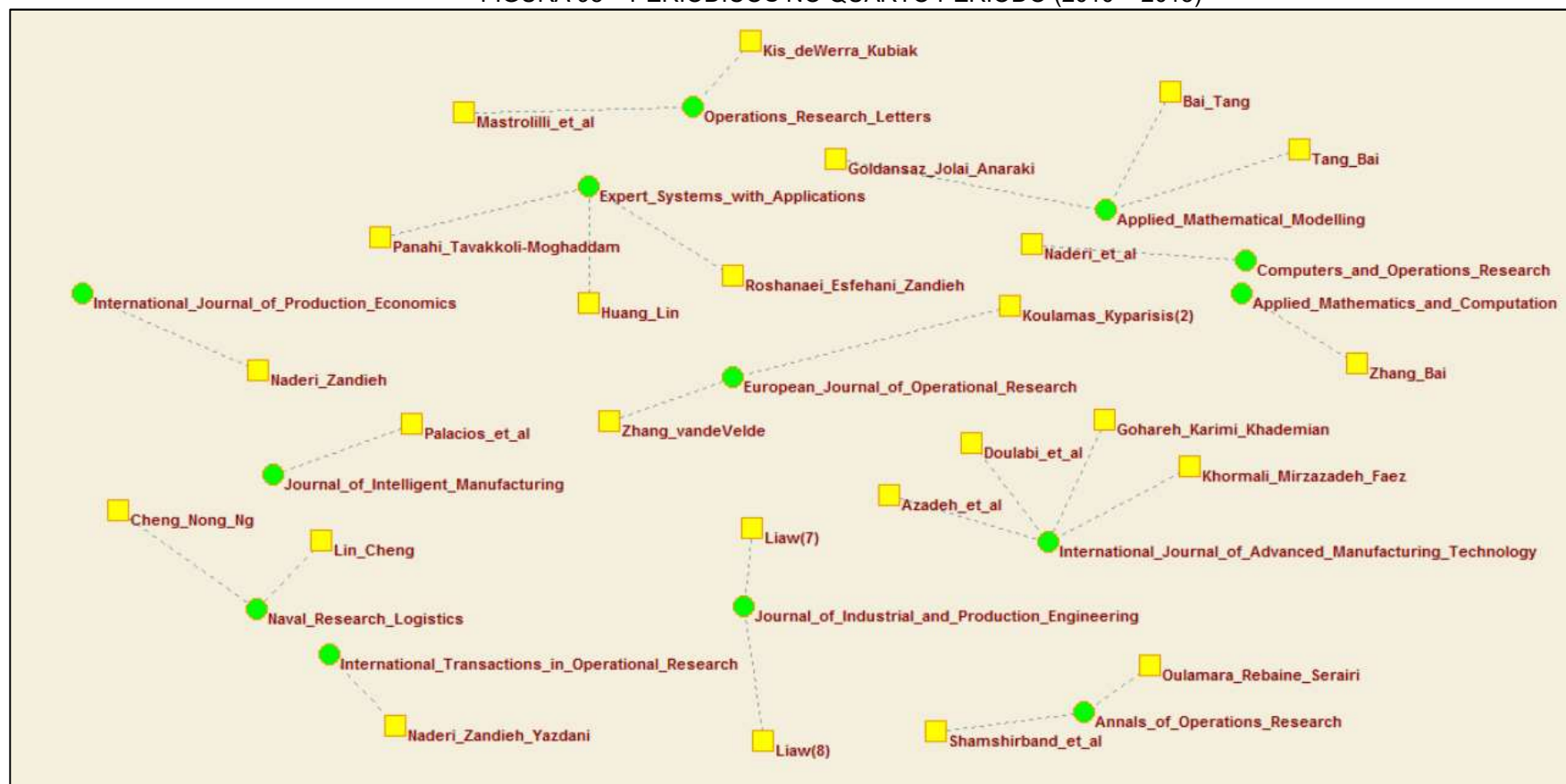
Dentre os autores, destaca-se Zandieh, que é autor ou co-autor em 4 artigos. Em Naderi, Fatemi Ghomi, Amminayeri e Zandieh (2010), publicado na *Computers and Operations Research*, os autores apresentam quatro novas heurísticas para a resolução de modelos dinâmicos e *on-line* de *Open Shop*, visando à minimização do *makespan*.

Em Roshanaei, Esfehiani e Zandieh (2010), publicado na *Expert Systems with Applications*, os autores tratam do *Open Shop* com tempos de *setup* dependentes da sequência, visando à minimização do *makespan*, utilizando duas metodologias híbridas de resolução: a primeira combina uma busca em múltiplas vizinhanças (*multi-neighborhood search*) com o *Simulated Annealing*, enquanto a segunda combina uma busca local (*local search*) com o *Simulated Annealing*.

Em Naderi e Zandieh (2014), publicado na *International Journal of Production Economics*, os autores tratam do *Open Shop* sem espera, visando à minimização do *makespan*, utilizando para tal Algoritmos Genéticos, Busca em Vizinhança Variável (VNS) e métodos exatos, que consistem na resolução de três formulações de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Em Naderi, Zandieh e Yazdani (2014), publicado na *International Transactions in Operational Research*, os autores tratam do *Open Shop* proporcional (*proportionate*), visando à minimização do *makespan*, utilizando esquemas de aproximação em tempo polinomial (PTAS) como métodos resolutivos. A Figura 98 apresenta a rede representativa desse último estrato temporal escrutinizado.

FIGURA 98 – PERIÓDICOS NO QUARTO PERÍODO (2010 – 2015)



FONTE: O Autor (2017).

Em síntese, encerradas as análises concernentes a essa métrica, há alguns pontos a ser destacados. O primeiro deles repousa na quantidade consideravelmente menor de artigos de *Open Shop* face aos demais ambientes fabris.

Encontrou-se artigos referentes ao *Open Shop* em 20 periódicos distintos, que apresentam os mais variados enfoques, como a *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, com uma abordagem mais voltada à Engenharia e como a *Mathematical Methods of Operations Research*, com um olhar mais voltado à teoria e à matemática envolvida na otimização dos modelos.

Por fim, há que se destacar a importância de Liaw para o estudo do tema, posto que este é autor ou co-autor de um sétimo dos artigos pertencentes à revisão. Em termos de pesquisa e trabalhos futuros, o autor deve observar qual o enfoque e escopo que seu trabalho possui, a fim de enviá-lo ao periódico que mais se encaixa ao prisma em que o autor se deteve no que concerne ao estudo dessa configuração produtiva.

7.11 QUADRO-SÍNTESE DE *OPEN SHOP*

As análises e resultados encontrados à luz das dez métricas utilizadas na categorização destes 70 artigos estão sumarizadas no Quadro 39.

QUADRO 39 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *OPEN SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continua)

Autores	Tipo Artigo			Classe Prog. Prod.		Modo Chegada Itens		Natureza Geração Dados			Característica dos Itens	Critérios de Otimalidade	Tipo Métodos				
	Problemas Específicos	Complexidade	Comparação	Off-line	On-line	Estático	Dinâmico	Determinístico	Estocástico	Determinístico/Estocástico			Exato	Heurístico	Meta-heurístico	Híbrido	Não-Especificado
Gonzalez e Sahni (1976)	X	X		X		X		X			Clássico; Interrupção	Makespan	X				
Lawler et al. (1982)	X			X		X		X			Geral; Interrupção	Makespan	X				
Pinedo e Ross (1982)	X			X		X			X		Clássico; Interrupção	Makespan					X
Adiri e Amit (1983)	X			X		X		X			Dependente da Rota	Makespan		X			
Pinedo (1984)	X			X		X			X		Interrupção; Data de Entrega	Itens atrasados; Tempo de Fluxo		X			
Liu e Bulfin (1985)		X		X		X		X			Interrupção (1); Interrupção; Deadlines (2)	Tempo de Fluxo					X
Liu e Bulfin (1987)	X	X		X		X		X			Interrupção; Itens ordenados; Problema ordenado	Soma dos Tempos de Conclusão (1); Makespan (2)	X				
Chung e Mohanty (1988)	X			X		X			X		Interrupção	Makespan	X	X			
de Werra et al. (1991)	X	X		X		X		X			Interrupção	Tempo Total de Conclusão		X			
Frostig (1991)	X			X		X			X		Clássico	Makespan					X
Strusevich (1993)	X			X		X		X			Clássico	Makespan	X				
Brucker et al. (1993)	X			X		X		X			Tempos unitários de processamento	Número Ponderado de Itens Atrasados	X				
Brässel et al. (1994)	X	X		X		X		X			Tempos de execução unitários	Makespan	X				

QUADRO 39 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *OPEN SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Cepek et al. (1994)	X	X		X		X		X			Tempos de processamento restritos	Makespan	X				
Galambos e Woeginger (1995)	X	X		X		X		X			Tempos de execução unitários; Datas de Liberação	Número Ponderado de itens atrasados	X				
Vairaktarakis e Sahni (1995)	X	X		X		X		X			Interrupção	Makespan		X			
Kellerer et al. (1995)	X	X		X		X		X			Tempos de execução unitários; Datas de Liberação; Datas de entrega	Lateness máximo		X			
Tautenhahn (1996)	X			X		X		X			Datas de Liberação; Tempos de execução unitários	Tempo Total de Conclusão; Makespan	X				
Chen et al. (1997)	X	X			X		X	X			Datas de Liberação(1); Datas de Liberação; Interrupção (2)	Makespan	X	X			
Tautenhahn e Woeginger (1997)	X	X		X		X		X			Datas de Liberação; Tempos de execução unitários	Tempo Total de Conclusão		X			
Strusevich (1998)	X			X		X		X			Clássico	Makespan		X			
Guéret e Prins (1998)	X		X	X	X	X	X	X			Clássico	Tempo Computacional; Makespan		X			
Koulamas e Kyparisis (1998)	X	X		X		X		X			Datas de entrega em comum	Itens atrasados		X			
Lann et al. (1998)		X		X		X		X			Overlapping	Soma dos Tempos de Conclusão		X			
Liaw (1998)	X			X		X		X			Clássico	Makespan		X			
Drobouchevitch e Strusevich (1999)	X			X		X		X			Clássico	Makespan	X				
Liaw (1999)	X			X		X		X			Clássico	Makespan				X	
Schuurman e Woeginger (1999)	X			X		X		X			Clássico	Makespan		X			
Kyparisis e Koulamas (2000)	X	X		X		X		X			Clássico	Tempo Total de Conclusão Sujeito à Minimização do Makespan		X			

QUADRO 39 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *OPEN SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Liaw (200)	X			X		X		X			Clássico	Makespan				X	
Prins (2000)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan			X		
Liaw et al. (2002)	X		X	X		X		X			Restrições de Precedência	Tempo Total de Conclusão	X	X			
Liaw (2003)	X			X		X		X			Interrupção	Atraso Total				X	
Gupta et al. (2003)	X	X	X	X		X		X			Clássico	Makespan; Tempo Total de Fluxo		X			
van den Akker et al. (2003)	X			X		X		X			Deadlines	Makespan	X	X			
Liaw (2004)	X			X		X		X			Interrupção	Tempo Total de Conclusão	X	X			
Blum (2005)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan				X	
Liaw (2005)	X		X	X		X		X			Interrupção	Atraso Total	X	X			
Liaw et al. (2005)	X		X	X		X		X			Sem espera	Makespan	X	X			
Gribkovskaia et al. (2006)	X	X		X		X		X			Soma de Lotes	Makespan		X			
Shabtay e Kaspi (2006)	X			X		X		X			Tempos de Processamento Dependente dos Recursos; Limite Superior no Consumo de Recursos (1); Interrupção (2)	Makespan		X			
Kubzin et al. (2006)	X	X		X		X		X			Intervalos de Indisponibilidade; Muitos buracos, uma máquina; Um buraco em cada máquina	Makespan		X			
Sha e Hsu (2008)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan				X	
Lin et al. (2008)	X		X	X		X		X			Sem espera	Tempo Ocupação Total m-estágios		X			
Matta (2009)	X			X		X		X			Proporcional	Makespan			X		
Naderi et al. (2010)	X				X		X	X			Classical	Makespan		X			
Roshanaei et al. (2010)	X			X		X		X			Tempo Setup Dependente Sequência	Makespan				X	
Kis et al. (2010)	X	X		X		X		X			Interrupção	Makespan		X			
Mastrolilli et al. (2010)	X	X		X		X		X			Clássico	Soma Ponderada Tempos de Conclusão		X			

QUADRO 39 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *OPEN SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (continuação)

Tang e Bai (2010)	X			X		X		X			Número itens múltiplo número máquinas	Tempo Total de Conclusão		X			
Zhang e van de Velde (2010)	X	X			X		X		X		Janelas de Tempo	Makespan		X			
Huang e Lin (2011)	X		X	X		X		X			Clássico	Makespan				X	
Cheng et al. (2011)	X	X		X		X		X			Clássico	Soma Ponderada Tempos de Conclusão	X	X			
Lin e Cheng (2011)	X	X		X		X		X			Lotes Centralizados; Lotes Descentralizados	Lateness máximo; Soma Ponderada Itens Atrasados; Soma Ponderada Tempos de Conclusão		X			
Panahi e Tavakkoli- Moghaddam (2011)	X	X		X		X		X			Clássico	Makespan; Atraso Total (Multiobjetivo)				X	
Doulabi et al. (2012)	X		X	X		X		X			Just in Time	Soma Ponderada Atrasos e Adiantamentos				X	
Khormali et al. (2012)	X		X	X		X		X			Lotes	Makespan	X		X		
Bai e Tang (2013)	X			X	X		X	X			Datas de entrega	Makespan		X			
Goldansaz et al. (2013)	X		X	X		X		X			Tempos de Setup	Makespan				X	
Oulamara et al. (2013)	X	X	X	X		X		X			Recursos Adicionais	Makespan		X			
Liaw (2013)	X		X	X		X		X			Interrupção	Tempo Total de Conclusão	X				
Zhang e Bai (2014)	X			X		X		X			Classical	Soma dos Tempos Quadráticos de Conclusão				X	
Gohareh et al. (2014)	X		X		X	X			X		Clássico	Soma Ponderada Atrasos e Adiantamentos		X			

QUADRO 39 – CLASSIFICAÇÃO DOS ARTIGOS DE *OPEN SHOP* DE ACORDO COM A TAXONOMIA PROPOSTA (conclusão)

Naderi e Zandieh (2014)	X		X	X		X		X			Sem espera	Makespan	X		X		
Naderi et al. (2014)	X	X		X		X		X			Proporcional	Makespan		X			
Liaw (2014)	X			X		X		X			Preempção	Número itens atrasados		X			
Azadeh et al. (2015)	X		X	X		X				X	Manutenção	Disponibilidade da máquina; Makespan; Atrasos e avanços			X		
Shamshirband et al. (2015)	X			X		X		X			Clássico	Makespan			X		
Koulamas e Kyparisis (2015)	X	X		X		X		X			Proporcional	Makespan	X	X			
Palacios et al. (2015)	X		X	X		X			X		Tempos de Processamento Difusos; Fuzzy Datas de Entrega Difusa	Makespan Esperado; Satisfação da Data de Entrega Agregada			X		

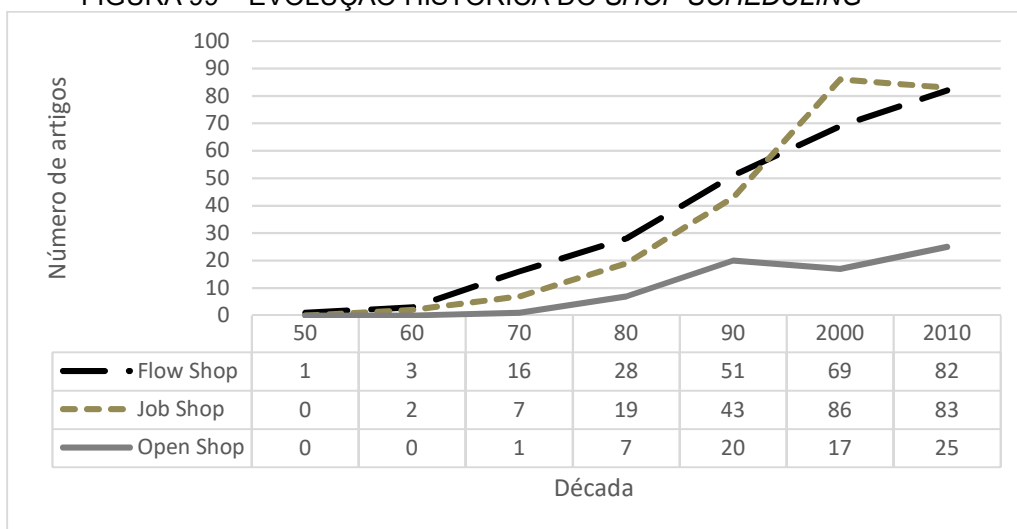
FONTE: O Autor (2017).

8 ANÁLISE CONJUNTA DOS AMBIENTES DE *SHOP SCHEDULING*

Nesse capítulo faz-se a análise conjunta dos ambientes que compõem o *Shop Scheduling*. Desse modo, analisa-se cada métrica à luz dos três ambientes, de modo a identificar, do ponto de vista quantitativo, os aspectos que ocorrem com maior frequência quando do estudo da Programação da Produção nessas configurações produtivas, ao longo dos 560 artigos pertencentes ao escopo da presente revisão. Ao final desse capítulo, a partir dos resultados apresentados em cada uma das métricas, ter-se-á o panorama atual dos estudos e considerações acerca de perspectivas futuras no que tange à pesquisa referente a esse importante tomo do Planejamento e Controle da Produção (PCP).

8.1 ANO

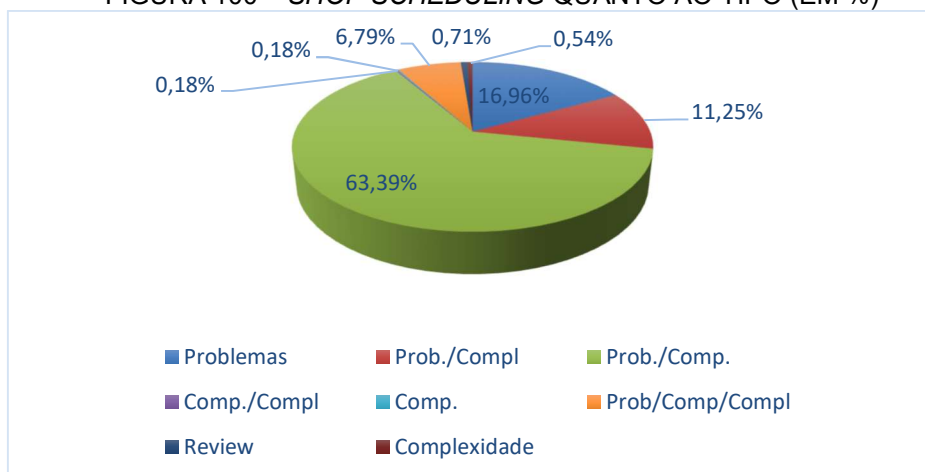
No que concerne a análise conjunta dos ambientes respectiva a essa métrica, tem-se o predomínio do *Job* e do *Flow Shop*, que são os ambientes há mais tempo estudados e que conservam maior número de aplicações quando analisados sob o prisma da realidade encontrada nas organizações e chãos-de-fábricas. Dos 560 artigos escrutinizados, 250 são de *Flow Shop*, 240 de *Job Shop* e apenas 70 trabalhos estudam o *Open Shop*. Há que se ressaltar que o estudo do *Open Shop* inicia-se em 1976. No entanto, antes dessa data, havia apenas 14 artigos de *Flow Shop* e 7 estudos de *Job Shop*, dentre aqueles pertencentes ao escopo da revisão, publicados até o seminal trabalho de Gonzalez e Sahni. Conforme ressaltado no capítulo anterior, a maior complexidade do *Open Shop* face aos demais ambientes fabris é uma das explicações para essa menor quantidade de trabalhos referentes à temática. A Figura 99 apresenta a evolução histórica dos ambientes, refletida aqui na quantidade de artigos publicados por período.

FIGURA 99 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO *SHOP SCHEDULING*

FONTE: O Autor (2017).

8.2 TIPO

Ao fim dos estudos tangentes aos três ambientes fabris, identifcou-se oito tipos de artigo, correlatos a essas configurações produtivas, a saber, Problemas; Problemas/Complexidade; Problemas/Comparação; Comparação/Complexidade; Comparação; Problemas/Comparação/Complexidade; *Review*; e Complexidade. Alguns desses tipos não estão presentes em todos os ambientes, como o *Review*, presente apenas quando dos estudos de *Job Shop*. A Figura 100 representa o percentual do tipo de artigo encontrado quando da análise dos 560 artigos nesta dissertação verificados. Colocar uma casa a mais de precisão meu deus como deixei passar isso).

FIGURA 100 – *SHOP SCHEDULING* QUANTO AO TIPO (EM %)

FONTE: O Autor (2017)

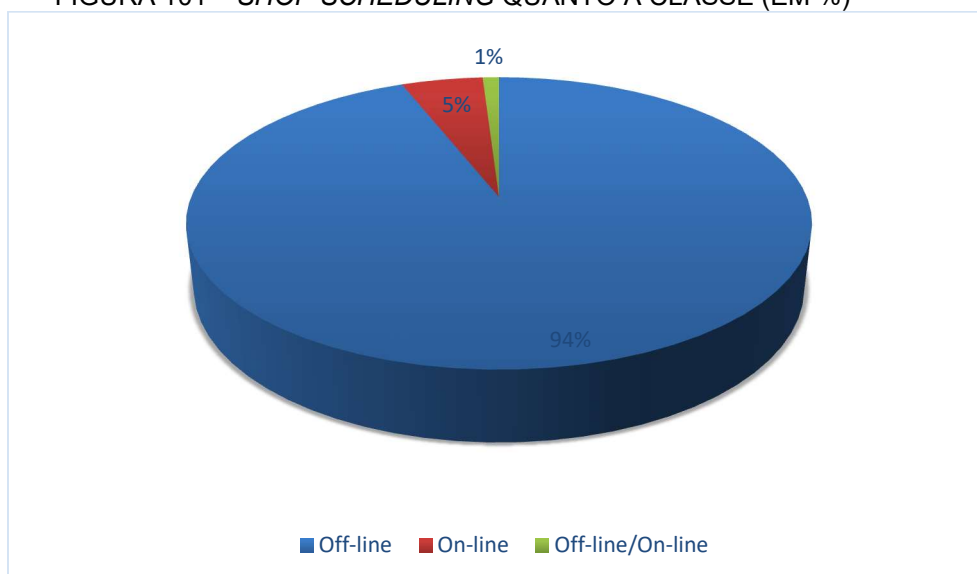
Desse total de artigos estudados, tem-se apenas 1 que faz um estudo exclusivamente comparativo e 1 que aborda, de maneira detida, a temática da complexidade computacional e teórica do *Shop Scheduling*. Por causa disso, esses tipos aparecem com 0% na figura. Outro ponto relevante a se destacar é que dos 560 artigos analisados, 355 são referentes ao tipo Problemas/Comparação, o que corresponde a 63% dos artigos pesquisados. Conforme mencionado em capítulos anteriores, em artigos dessa categoria, os autores fazem alguma aplicação de algum procedimento resolutivo e compara-se os resultados obtidos aos encontrados por outros métodos, presentes em demais estudos daquela temática, ou no que tange às respostas obtidas em instâncias consagradas da literatura.

Em relação aos demais tipos, há que se destacar a pouca quantidade de artigos que realizam estudos conjuntos com as três categorias basilares da análise (Problemas/Comparação/Complexidade), com apenas 7% dos trabalhos aqui categorizados.

8.3 CLASSE DA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Em relação a essa métrica, constata-se o predomínio, quando do estudo conjunto das três configurações produtivas componentes do *Shop Scheduling*, o predomínio da produção *off-line* se comparado às demais categorias. Dos 560 artigos analisados, 526 abordam essa classe, cuja característica que a distingue é o conhecimento prévio de todas as informações referentes à Programação da Produção. A Figura 101 apresenta esse panorama, à luz do percentual de artigos estudados referentes a cada categorização dessa métrica.

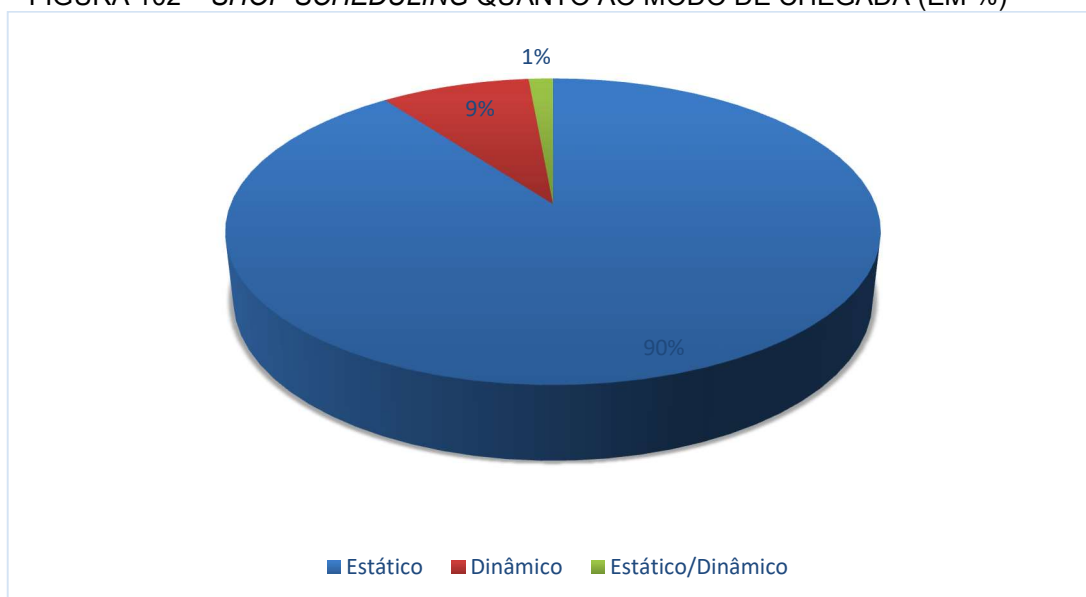
FIGURA 101 – SHOP SCHEDULING QUANTO À CLASSE (EM %)



FONTE: O Autor (2017).

8.4 MODO DE CHEGADA DOS ITENS

Assim como verificada na métrica anterior, há um evidente predomínio de uma das categorias em que a métrica é segmentada face às demais tipificações. No que tange ao modo de chegada dos itens, modelos estáticos, caracterizados pela inexistência de inserções e, ou, desistências ao longo do processo produtivo, são abordados em 503 dos 560 artigos escrutinizados. Em seguida, tem-se os modelos dinâmicos, com 49 trabalhos aqui categorizados. Em último lugar estão os estudos que fazem artigos em que se pondera acerca dos dois modos de chegada. Tal tipo de trabalho aparece em 8 artigos. A Figura 102 retrata esse cenário, correlato à representatividade, em termos percentuais, de cada categoria avaliada sob o prisma dessa métrica.

FIGURA 102 – *SHOP SCHEDULING* QUANTO AO MODO DE CHEGADA (EM %)

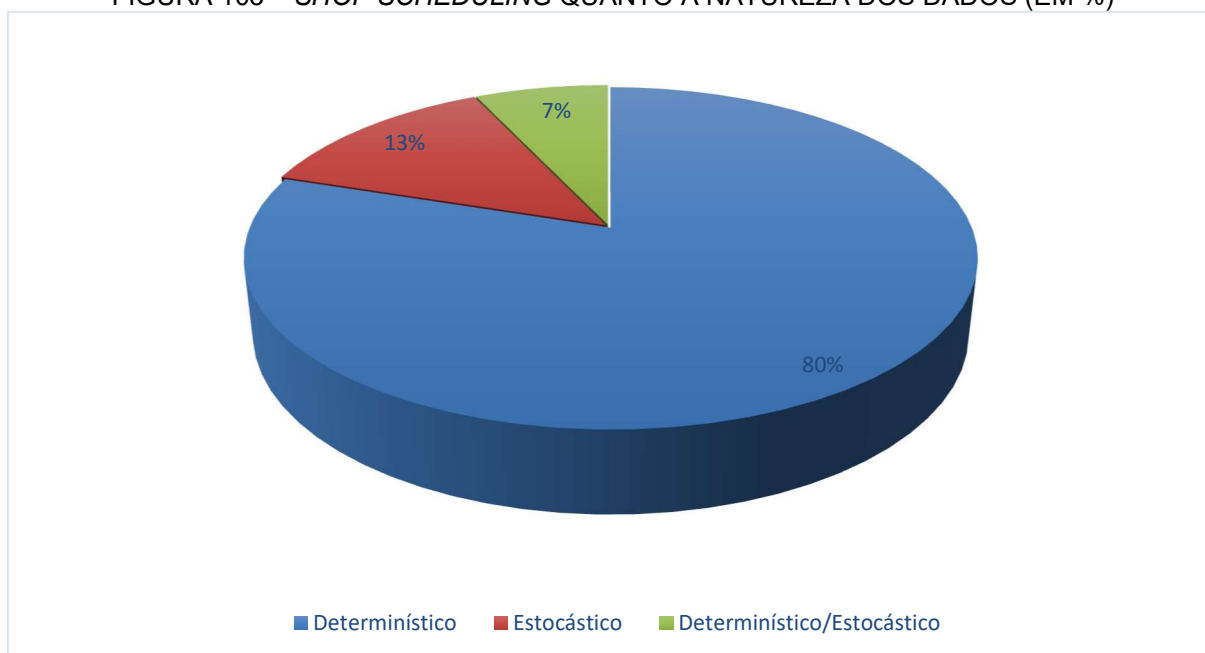
FONTE: O Autor (2017).

8.5 NATUREZA DA GERAÇÃO DE DADOS

No que concerne à natureza da geração dos dados, tem-se o predomínio dos modelos determinísticos, que aparecem, de maneira exclusiva, em 356 dos 560 artigos estudados. No entanto essa prevalência é menor do que aquela verificada em outras métricas, posto que os modelos estocásticos são trabalhados em 173 artigos, o que corresponde a 31% do total.

Outro ponto a destacar é a baixa quantidade de artigos que abordam problemas de *Shop Scheduling* que apresentam um conjunto híbrido de dados, com apenas 31 trabalhos aqui categorizados. Destes, apenas 8 são trabalhados no *Job Shop*, o que corresponde a apenas 3,3% dos estudos dessa configuração produtiva.

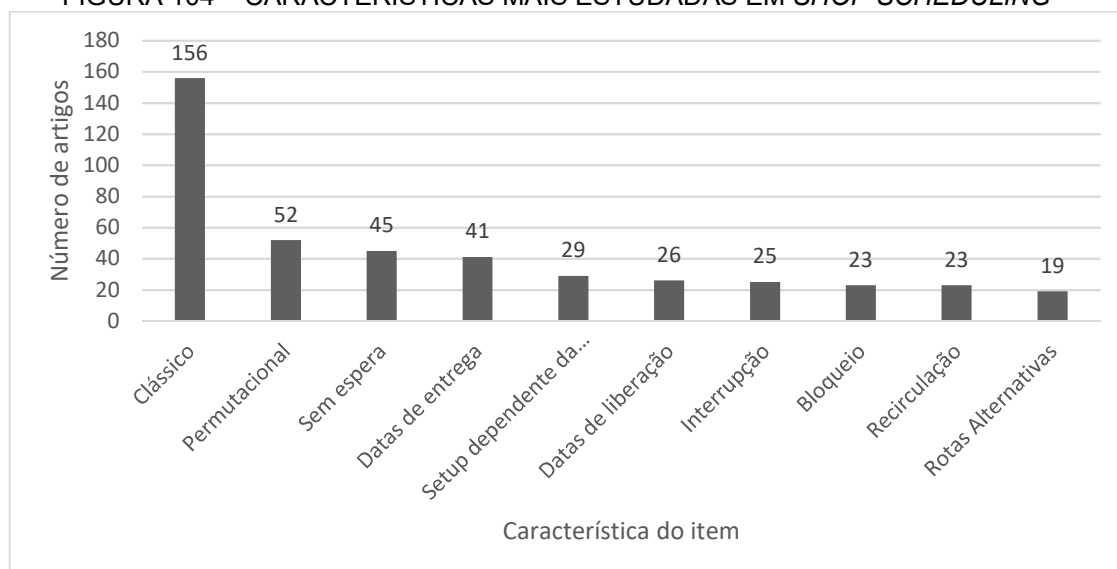
A Figura 103 apresenta o gráfico de setores que expõe, em termos percentuais, a importância de cada categoria em que a natureza da geração dos dados foi segmentada.

FIGURA 103 – *SHOP SCHEDULING* QUANTO À NATUREZA DOS DADOS (EM %)

FONTE: O Autor (2017).

8.6 CARACTERÍSTICAS DOS ITENS

No que tange a essa métrica, registrou-se 278 entradas de dados referentes às características dos itens, sendo 139 concernentes ao *Flow Shop*, 102 respectivas ao *Job Shop* e apenas 37 correlatas ao *Open Shop*. A Figura 104 apresenta as 10 características dos itens mais abordadas nos 560 artigos pertencentes ao escopo dessa revisão.

FIGURA 104 – CARACTERÍSTICAS MAIS ESTUDADAS EM *SHOP SCHEDULING*

FONTE: O Autor (2017).

Em relação aos exposto na figura, tem-se o predomínio dos modelos clássicos, cuja ocorrência é verificada em 156 dos 560 artigos. Outro ponto relevante a se destacar é a frequência em que se estuda modelos permutacionais, posto que este é apenas encontrado quando do estudo do *Flow Shop*. Apesar disso, há 52 trabalhos que abordam essa característica do item, posto que esta simplifica os modelos desse ambiente, a partir da diminuição do espaço de soluções. Essa diminuição se dá em virtude de que os modelos permutacionais ensejam o mesmo ordenamento dos itens em cada uma das estações de trabalho.

Em terceiro e quarto lugares estão as características sem espera, presente em 45 trabalhos e as datas de entrega, presentes em 41. Em relação à primeira, esta é aplicada em trabalhos em que não se assume o pressuposto clássico de existência de capacidade infinita de estocagem, isto é, os itens podem esperar ilimitadamente pela máquina que deve processá-lo subsequentemente. Essa característica encontra aplicabilidade na vida real, em indústrias como a farmacêutica, a metalúrgica e a alimentícia.

No tangente à segunda, esta se apresenta com frequência porque muitos modelos tem a preocupação com objetivos relacionados à data de entrega. Além disso, a preocupação em atender aos prazos prometidos ao cliente, o que aproxima a teoria da prática, ajuda a entender a frequência com que tal característica é abordada nos estudos de *Shop Scheduling*.

Outrossim, há que se ressaltar os modelos preemptivos, com 25 estudos aqui classificados. Essa característica é pouco usual em modelos de *Flow* e *Job Shops*, com apenas 8 estudos relativos à preempção nesses dois ambientes, mas presente em 17 dos 70 artigos de *Open Shop*, posto que a interrupção diminui a complexidade desse ambiente, conforme ressaltado no capítulo anterior.

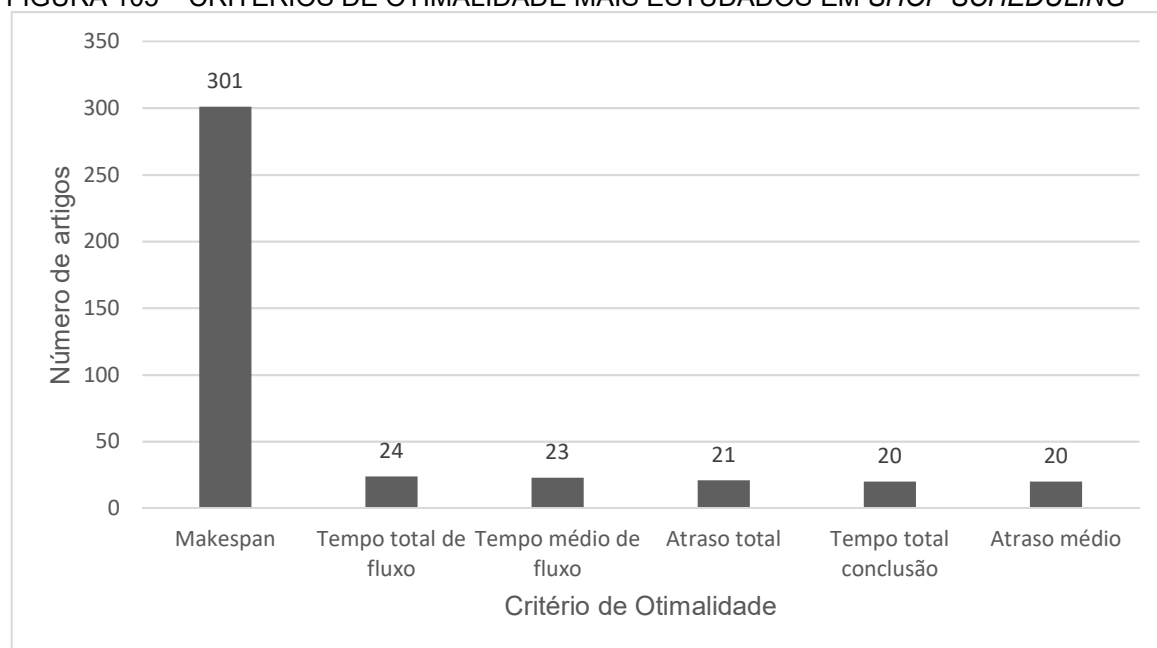
Por fim, deve-se ressaltar que essas 10 características são encontradas em 439 dos 560 estudos, ou seja, em 78,39% dos casos.

8.7 CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE

Quando do estudo dessa métrica, registrou-se 320 entradas de dados referentes aos critérios de otimalidade utilizados nos 560 artigos escrutinizados nessa revisão. Destas, 95 são referentes ao *Flow Shop*, 207 correlatas ao *Job Shop* e apenas 18 relativas ao *Open Shop*. Essa quantidade consideravelmente maior de critérios de otimalidade é explicada porque esse ambiente teve, dentre os estudos analisados, muitos que utilizaram a simulação como um dos métodos utilizados na resolução dos problemas respectivos a essa configuração produtiva. Em cada estudo desses, os autores testavam as heurísticas propostas ou advindas da literatura em diversos cenários, construídos a partir da variação de diversos aspectos. Um desses aspectos é o critério de otimalidade. Nesses estudos, os autores empregam uma série deles. Um exemplo dessa prática é o artigo de Abdallah (1995), em que se estuda a resolução de 12 critérios de otimalidade distintos.

A Figura 105 apresenta o gráfico em que se mostra os 6 critérios de otimalidade mais estudados no *Shop Scheduling*.

FIGURA 105 – CRITÉRIOS DE OTIMALIDADE MAIS ESTUDADOS EM *SHOP SCHEDULING*



FONTE: O Autor (2017).

A partir dos resultados, tem-se que o *makespan* determinístico é, preponderantemente, o objetivo mais tratado nos artigos, posto que dos 560 artigos analisados, este é pelo menos um dos critérios de otimalidade em 301 dos estudos.

Em relação aos demais objetivos apresentados, constata-se equilíbrio entre a utilização destes. Destaca-se que os objetivos orientados à data de entrega, como o atraso total e o atraso médio, são utilizados em 21 e 20 trabalhos de *Shop Scheduling*, respectivamente.

Além desses, há que se destacar também que dentre os critérios de otimalidade mais estudados no que tange aos três ambientes fabris componentes do *Shop Scheduling* os objetivos relacionados ao inventário, como os tempos total e médio de fluxo, cuja otimização é ao menos um dos objetivos tratados em 24 e 23 artigos, respectivamente.

8.8 TIPOS DE MÉTODOS RESOLUTIVOS

Identificou-se ao fim da análise dos artigos revisados oito classes de métodos resolutivos, sendo que alguns destes não são encontrados em todos os ambientes fabris. São eles: o método exato, o método heurístico, as hibridações, o método meta-heurístico, a *math-heuristic*, a simulação, as RP's (regras de prioridade) e os métodos não-especificados. Ao todo, registrou-se 2232 entradas de métodos resolutivos, sendo 1085 de *Flow Shop*, 1030 de *Job Shop* e 117 de *Open Shop*. A Tabela 1 traz a quantidade de métodos resolutivos por ambiente fabril e por tipo de método resolutivo.

TABELA 1 – MÉTODOS RESOLUTIVOS POR TIPO

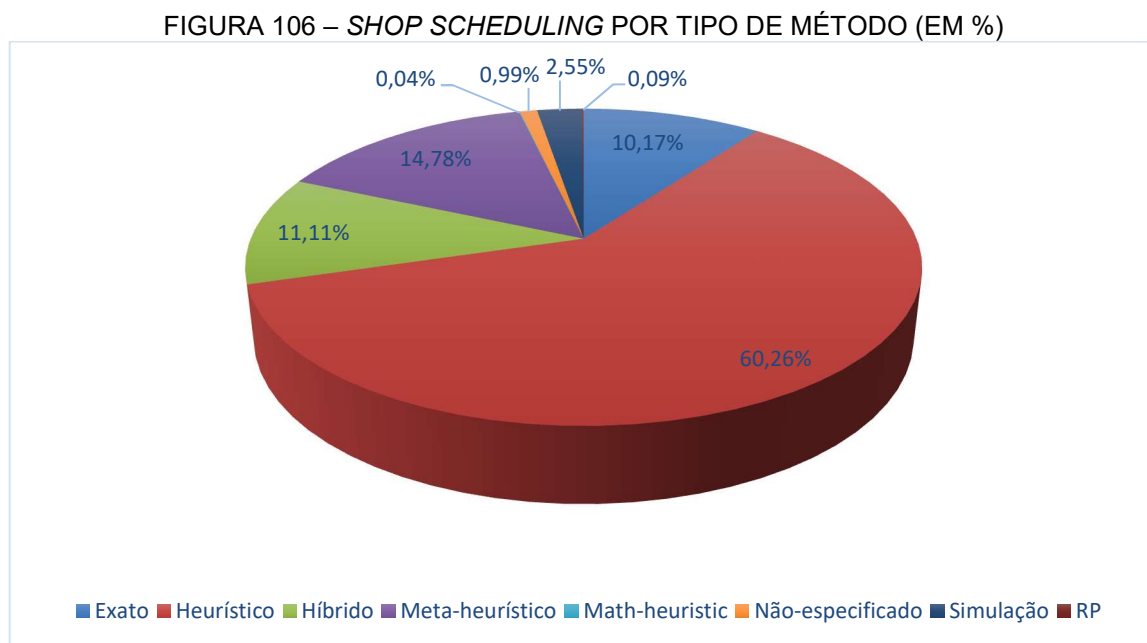
Tipo	Ambiente Fabril			Total
	<i>Flow Shop</i>	<i>Job Shop</i>	<i>Open Shop</i>	
Exato	145	57	25	227
Heurístico	574	706	65	1345
Híbrido	136	99	13	248
<i>Math-heuristic</i>	1	0	0	1
Meta-heurístico	201	119	10	330
Não-especificado	16	2	4	22
Simulação	12	45	0	57
RP	0	2	0	2
Total	1085	1030	117	2232

FONTE: O Autor (2017).

A partir dos resultados apresentados na tabela, constata-se o elevado número de heurísticas utilizadas nos artigos revisados, com 1345 entradas. Conforme relatado em capítulos anteriores, devido à facilidade de implementação que tais métodos

possuem, diversos artigos aplicam e,ou, propõem mais de uma heurística como método resolutivo. Um exemplo disso é o trabalho de Ogüz et al. (2003), em que os autores propõem 9 heurísticas a ser aplicadas em um *Flow Shop* híbrido com dois estágios.

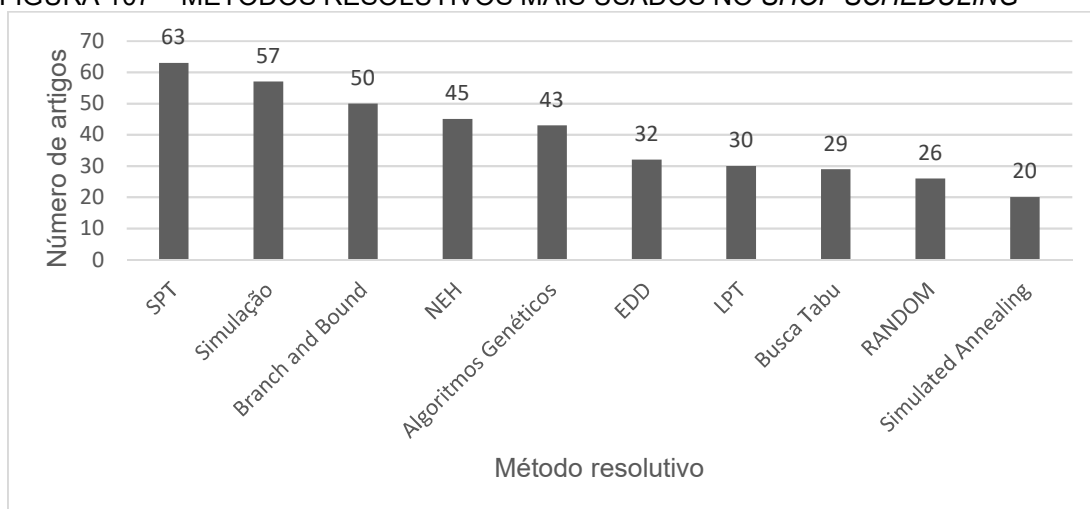
A Figura 106 apresenta, em termos percentuais, o panorama correlato ao *Shop Scheduling*, no que concerne ao tipo de método resolutivo.



FONTE: O Autor (2017).

8.9 MÉTODOS RESOLUTIVOS

Em relação aos métodos resolutivos, nota-se a utilização pronunciada de heurísticas clássicas de sequenciamento, como a SPT, métodos exatos, como o *Branch and Bound*, heurísticas mais completas, como a NEH, que é constantemente utilizada nos estudos correlatos ao *Flow Shop*, entre outros. A Figura 107 apresenta os 10 métodos resolutivos mais utilizados nos 560 artigos aqui avaliados.

FIGURA 107 – MÉTODOS RESOLUTIVOS MAIS USADOS NO *SHOP SCHEDULING*

FONTE: O Autor (2017).

Conforme citado anteriormente, a heurística SPT é o método resolutivo mais utilizado nos trabalhos correlatos ao *Shop Scheduling*. Dos 560 artigos verificados, 63 deles utilizaram em algum momento de suas análises tal procedimento resolutivo. Esse procedimento é caracterizado pela considerável simplicidade de sua implementação e pelo baixo custo computacional, trazendo resultados não muito satisfatórios, quando usado de maneira individualizada, mas podendo ser um método para obtenção de soluções iniciais a ser melhoradas por métodos mais completos.

A simulação tem uma posição de destaque, devido ao seu elevado emprego nos artigos referentes ao *Job Shop*, em que os autores estudaram diversas características de heurísticas clássicas de sequenciamento, bem como métodos resolutivos mais complexos, como as meta-heurísticas, face a diferentes cenários construídos a partir da variação de componentes da programação, como o nível de utilização da máquina, a rigidez da data de entrega, janelas de tempo nas datas de liberação, tempos de processamento, entre outros. Os trabalhos que englobam a simulação geralmente apresentam diversos métodos resolutivos e um grande número de critérios de otimalidade estudados, em que se investiga o significado operacional, mais voltado à aplicabilidade prática dos modelos, de cada resultado obtido, no que concerne à definição de quais métodos resolutivos se deve lançar mão, relacionando-os ao tipo de objetivo em que o estudo visa a otimizar.

Dentre os métodos exatos, aquele que é mais utilizado é, indubitavelmente, o *Branch and Bound*. Contudo, o método é utilizado em problemas mais teóricos, em

instâncias menores, como em Liaw, Cheng e Chen (2002), que resolveram problemas de até 7 itens e 7 máquinas com essa metodologia. Apesar do uso restrito desse método a essas instâncias mais teóricas, foi com o *Branch and Bound* proposto em Carlier e Pinson (1989), que a famosa instância 10x10 de Muth e Thompson (1963), para problemas de *Job Shop*, foi pela primeira vez resolvida à otimalidade.

No tangente a outras heurísticas clássicas de sequenciamento frequentemente utilizadas, tem-se a EDD, a LPT e a definição aleatória (*RANDOM*) do sequenciamento, que são empregadas pelas mesmas razões expostas quando da análise do emprego da SPT. No caso destas, tem-se a utilização em 32 , 30 e 26 dos 560 artigos, respectivamente.

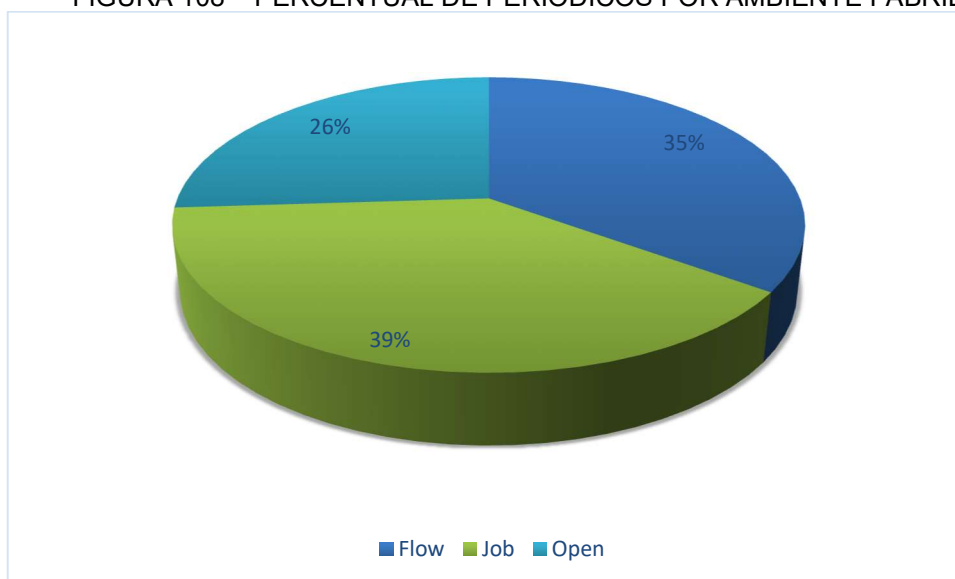
Em relação à NEH, esta é utilizada, majoritariamente, em problemas de *Flow Shop*. Trata-se de um método proposto em 1983 por Nawaz, Ensore Jr e Ham, que até os dias atuais é utilizado com frequência, em virtude dos bons resultados que a heurística traz, muito superiores aos obtidos por heurísticas clássicas de sequenciamento. Uma de suas utilizações mais comuns atualmente é o emprego deste método como gerador de soluções iniciais a ser melhoradas por uma meta-heurística, ou a hibridação deste com outro método resolutivo, que pode ser outra heurística, como em Naderi et al. (2010), ou combinado a uma meta-heurística, como em Chang et al. (2013).

Por fim, dentre os métodos mais utilizados, há as meta-heurísticas Algoritmos Genéticos, Busca Tabu e *Simulated Annealing*, presentes em 43, 29 e 20 artigos, respectivamente.

8.10 PERIÓDICOS

No que concerne a essa métrica, a presente revisão registrou 77 entradas de periódicos, sendo 27 de *Flow Shop*, 30 de *Job Shop* e 20 de *Open Shop*. A Figura 108 apresenta, em termos percentuais, essa proporção.

FIGURA 108 – PERCENTUAL DE PERIÓDICOS POR AMBIENTE FABRIL

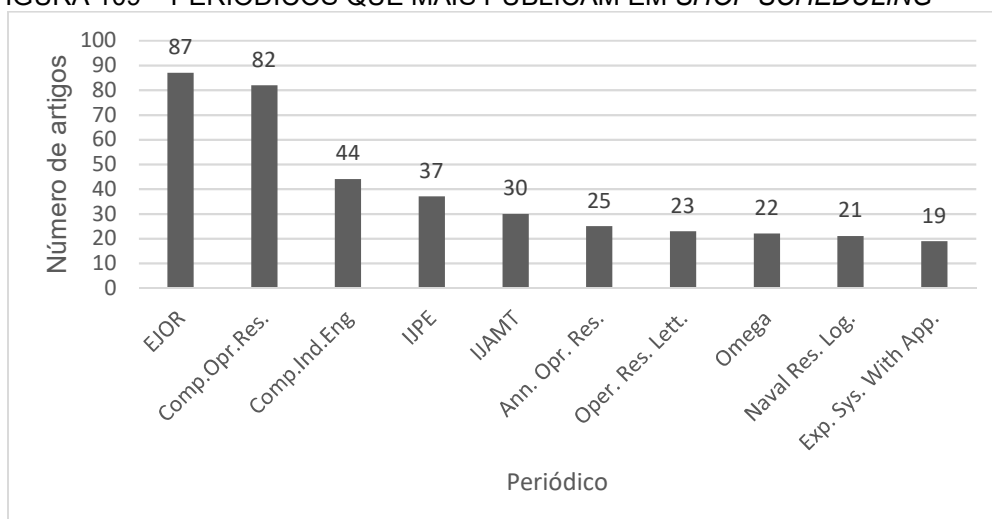


FONTE: O autor (2017).

Apesar do menor número de artigos, se comparado ao *Flow Shop*, tem-se um maior número de periódicos que abordaram o *Job Shop*, posto que este foi tratado em 30 periódicos distintos, enquanto aquele foi versado por 27. Há que se destacar também, nesse tocante, a menor variedade de periódicos dedicados ao *Open Shop* (20), algo já esperado, posto que a quantidade de trabalhos correlatos a essa temática corresponde a um oitavo do total.

Há ainda que se ressaltar quais periódicos apresentam a maior quantidade de artigos concernentes ao *Shop Scheduling*. Na Figura 109, apresenta-se o gráfico com os 10 periódicos que mais publicam estudos correlatos a essa temática.

FIGURA 109 – PERIÓDICOS QUE MAIS PUBLICAM EM SHOP SCHEDULING



FONTE: O Autor (2017).

Em relação aos periódicos, há que se destacar tanto a *EJOR* quanto a *Computers and Operations Research*, que apresentam mais de 30% dos artigos publicados. Ambos os periódicos tem como foco o papel da Programação da Produção dentro da Pesquisa Operacional. Nos artigos apresentados nesses periódicos, tem-se a constante preocupação de apresentar problemas mais complexos e que fogem aos pressupostos clássicos, além de apresentar métodos mais robustos de otimização, como em Blum (2005), cuja hibridação da *Beam Search* com a ACO apresentou diversas novas melhores soluções conhecidas para praticamente todas as instâncias difíceis de Taillard, quando do estudo do *Open Shop*.

Outro ponto em relação a essa métrica a ser destacado, é o papel de periódicos como o *International Journal of Production Economics* (IJPE) e o *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (IJAMT), cujo foco é mais voltado às aplicações reais dos problemas e a apresentação de métodos híbridos e pouco usuais no estudo do *Shop Scheduling*, como o HCRO (Hybrid Chemical-Reaction Optimization), apresentado em Li e Pan (2013) que procura mimetizar o que acontece com as moléculas em uma reação química e tenta capturar a energia desse processo reativo.

Por fim, há que se destacar a *Naval Research Logistics*, que foi o periódico em que se publicou o seminal trabalho de Johnson (1954) e durante algumas décadas, foi um dos principais periódicos no que concerne ao *Shop Scheduling*. No entanto, nos dias atuais, há poucos artigos correlatos à temática nela publicados.

8.11 SÍNTESE DA ANÁLISE CONJUNTA DO *SHOP SCHEDULING*

Ao fim dessa análise conjunta dos ambientes componentes do *Shop Scheduling*, tem-se o seguinte panorama atual: artigos aqui analisados são na maioria do tipo Problemas/Comparação, *off-line*, estáticos, determinísticos, modelados segundo pressupostos clássicos, visando à minimização do *makespan*, resolvidos por métodos heurísticos e publicados na *EJOR*.

9 CONCLUSÃO

Na década de 1950, com o seminal trabalho de Johnson a Programação da Produção tornou-se uma área relevante e independente dentro da Pesquisa Operacional. Nesse trabalho estudou-se o *Flow Shop* com apenas duas e três máquinas. Para o primeiro caso, o autor propôs um algoritmo exato que é utilizado até hoje para problemas dessa natureza, enquanto que para o segundo, o método somente é aplicável caso condições específicas sejam atendidas.

Ainda nessa década, os estudos de Jackson e de Akers e Friedman abordam a temática do *Job Shop*, considerado uma generalização do *Flow Shop*, caracterizado pela multiplicidade de rotas e fluxos de processamento. O primeiro estende os resultados obtidos por Johnson quando do estudo do *Flow Shop* para o problema de *Job Shop* com duas máquinas. Além disso, cada item deve ter no máximo duas operações. Os segundos estudaram o problema com dois itens e cada um destes possui a sua própria rota de processamento e contemplaram em seu trabalho a possibilidade de recirculação dos itens nas estações de trabalho.

Na década seguinte, muito do que se desenvolveu nos estudos de Programação da Produção se deveu a dois livros considerados basilares para o estudo dessa temática. O primeiro, de autoria de Muth e Thompson, reúne uma coletânea de trabalhos cujo foco era encontrar soluções para problemas práticos. Nesse livro tem-se uma das mais famosas instâncias de problemas de Programação da Produção, aquela proposta por Fisher e Thompson, cujo problema de 10 itens e 10 máquinas só teria sua otimalidade provada por Carlier e Pinson, 26 anos mais tarde.

O segundo, de Conway, Maxwell e Miller traz tanto o arcabouço teórico da Programação da Produção determinística, bem como versa sobre a teoria das filas, algo recorrente nos trabalhos alusivos a essa área do conhecimento. Além disso, aqui faz-se o primeiro esboço de uma notação e classificação dos problemas de *scheduling*.

Outro ponto relevante dessa década é o trabalho de Ignall e Schrage que pela primeira vez faz uso do *Branch and Bound* na resolução de problemas de Programação da Produção. Nesse trabalho, o método é utilizado com vistas à minimização do *makespan*, em problemas com três máquinas.

Em meados da década de 1970, tem-se a introdução do terceiro e mais complexo ambiente que compõe o *Shop Scheduling*, o *Open Shop*, que tem como principal característica distintiva a indeterminação *à priori* das rotas de processamento dos itens. Esse trabalho, de autoria de Gonzalez e Sahni, contempla problemas com duas e três máquinas, visando à minimização do *makespan*, ou como os autores nesse estudo denominam, *schedule length*. Outro marco para o estudo da Programação da Produção registrado nesse período foi a classificação dos problemas de *scheduling* proposta por Graham, Lawler, Lenstra e Rinnooy Kan, ou simplesmente, Notação de Graham. Esta é baseada em três campos, correlatos ao ambiente fabril, características dos itens e critérios de otimalidade, representados pelas letras gregas alfa, beta e gamma, respectivamente. Até hoje, este sistema de classificação é empregado e amplamente difundido no contexto dos problemas de Programação da Produção. Além disso, com o surgimento de novos problemas e, ou, características dos itens outrora inauditas, essa classificação é constantemente atualizada de modo a abarcar as novas demandas.

A década de 1980 tem como principais contribuições a utilização de meta-heurísticas na resolução de problemas de Programação da Produção, posto que a partir da década passada, a temática da complexidade algorítmica dos problemas conhecidos de *scheduling* havia se consolidado. Como esses problemas apresentam, na maioria dos casos, grau de complexidade NP-difícil, entendeu-se que problemas em que houvesse incremento considerável no número de estações de trabalho e, ou, itens, tornaria a resolução de métodos exatos muito custosa no que tange ao esforço computacional. Portanto, tornou-se primordial a utilização de métodos cuja solução fosse próxima à ótima e com tempo computacional sensivelmente menor. Nesse contexto, tem-se a utilização do *Simulated Annealing* como no trabalho de Osman e Potts.

Além das meta-heurísticas, dois métodos heurísticos concebidos nesse período são marcos dessa década. O primeiro, proposto por Nawaz, Enscore Jr e Ham, é a heurística NEH, cuja aplicação em problemas de *Flow Shop* perdura até hoje, seja como método resolutivo único ou solução inicial a ser otimizada por meta-heurísticas. Esta se baseia na ordenação decrescente dos tempos de processamento dos itens. O segundo é a heurística do Gargalo Flutuante (SB – *Shifting Bottleneck*), muito utilizada nos problemas de *Job Shop*, cuja autoria é de Adams, Balas e Zawack.

Neste procedimento resolutivo, as máquinas são sequenciadas uma a uma, tomando-se dentre as estações de trabalho ainda não sequenciadas aquela identificada como gargalo.

Na década de 1990 tem-se um pronunciado aumento da utilização de meta-heurísticas na resolução dos problemas de *Shop Scheduling*. Dentre os trabalhos dessa década, aquele de Nowicki e Smutnicki, cuja Busca Tabu aplicada a problemas de *Flow Shop* Permutacional foi durante muito tempo o estado da arte no que concerne aos métodos resolutivos, posto que a metodologia empregada nesse estudo chegou a resolver instâncias de até 500 itens e 20 máquinas.

Em relação a essa década, há que se destacar mais dois momentos importantes quando do estudo da Programação da Produção. O primeiro deles é o trabalho desenvolvido por Taillard, em que se criou um conjunto de instâncias para problemas de *Flow*, *Job* e *Open Shop*, que é utilizado até hoje quando o foco do trabalho nessa temática desenvolvido está voltado à comparação de desempenho de diferentes metodologias resolutivas. Em relação ao *Open Shop*, as instâncias de Taillard são o primeiro conjunto de problemas criados especificamente para se testar e comparar os métodos resolutivos alusivos a este ambiente fabril. Outro ponto de destaque dessa década é a publicação do livro de Pinedo, que se torna o principal título da temática, posto que o autor aborda tanto a Programação da Produção determinística como a estocástica.

Na década de 2000 tem-se um aumento considerável no número de hibridações. Dentre essas hibridações, aquela proposta por Blum, combinando uma busca em feixe com uma Colônia de Formigas tornou-se o estado da arte em métodos resolutivos para o problema de *Open Shop*, encontrando os melhores resultados não só apenas para as instâncias clássicas de Taillard, mas também para as instâncias de Brucker et al. e de Guéret e Prins, consideradas ainda mais difíceis de ser otimizadas.

Essa década também é marcada pelo desenvolvimento de estudos cada vez mais complexos em relação à temática da Programação da Produção, como a questão da existência de períodos de indisponibilidade das máquinas, ressequenciamentos, inserções e, ou desistências de pedidos. O aumento da complexidade dos problemas é uma tentativa da academia em dirimir a lacuna entre o prisma teórico e a

aplicabilidade prática. Apesar do número de estudos aplicados aumentarem, o *gap* entre essas duas perspectivas ainda é bem considerável.

Na década de 2010, embora inconclusa, tem-se um aumento considerável na complexidade dos problemas de Programação da Produção. Cada vez mais enfatiza-se a aplicação e implementação de modelos multiobjetivos, modelos flexíveis, em que há não apenas a decisão relativa à ordem de produção dos itens, mas também em que estações de trabalho produzir, dado que em cada seção do fluxo produtivo há um conjunto de máquinas que podem realizar a mesma operação.

Outro ponto a se ressaltar do estudo da Programação da Produção atual é o aumento de métodos resolutivos híbridos e meta-heurísticos nos problemas alusivos a essa temática. Esses métodos estão cada vez mais rápidos como o PSO utilizado por Samarghandi para um problema de *Flow Shop* sem espera, em que se chega ao ótimo em apenas 2,4 segundos, ou 1397 vezes mais rápido que a solução via modelo matemático.

Essa década também é a responsável pela maior quantidade e diversidade de características dos itens e critérios de otimalidade estudados, além de preocupações outrora inexploradas, como o impacto ambiental, a eficiência energética, a desmontagem de produtos, entre outros. Apesar desses avanços, tanto a abordagem clássica do problema como o estudo do *makespan* continuam a ser as áreas mais abrangidas nos estudos de *scheduling*.

Ao longo dessas décadas, muito foi produzido em termos de trabalhos correlatos ao *Shop Scheduling*. Há dentre essa pletora de artigos, aqueles dedicados à síntese do estudo da temática, a partir do resgate de publicações reconhecidas no meio acadêmico como as melhores e mais relevantes. Esses estudos são denominados na esfera acadêmica como artigos de revisão. Contudo, tais artigos tem fragilidades como a inexistência de um conjunto de critérios, destinados à categorização e taxonomia dos artigos. Quando tais critérios alicerçam o estudo em curso, tem-se o que é denominado Revisão Sistemática da Literatura (RSL).

Neste trabalho realizou-se a Revisão Sistemática da Literatura em cada um dos ambientes que fazem parte do *Shop Scheduling*. Ao melhor do nosso conhecimento esse trabalho é o primeiro que realiza tal estudo voltado a essa temática. Para tal

intento, selecionou-se 560 artigos publicados em periódicos acadêmicos de alto impacto, classificados nas categorias Q1 e Q2 do SCImago *Journal e Country Rank* e, a partir de um conjunto objetivo de critérios (ano, tipo, classe da Programação da Produção, modo de chegada dos itens, natureza da geração dos dados, características dos itens, critérios de otimalidade, tipos de métodos resolutivos e métodos resolutivos), categorizou-se esses estudos, com a finalidade de propor uma nova taxonomia para os problemas de *Scheduling*.

Em relação à métrica ano, que tem por escopo analisar a evolução histórica do estudo de cada um dos ambientes correlatos ao *Shop Scheduling*, tem-se como principais resultados a maior quantidade de artigos de *Flow* e *Job Shop*, face à quantidade coletada alusiva ao *Open Shop*, explicada sob dois aspectos, a maior aplicabilidade prática dos dois primeiros, mais comuns em ambientes industriais e a maior complexidade do segundo, em virtude do maior espaço de soluções que a indefinição, aprioristicamente falando, das rotas de processamento traz consigo.

No que diz respeito aos tipos de artigo, há uma considerável predominância da categoria intitulada Problemas/Comparação. Nessa categoria, os autores não apenas aplicam um determinado método resolutivo em um problema, ora proposto, ora adaptado de um preexistente, como também contrapõem-no aos procedimentos utilizados por outros autores, utilizando como dados de entrada as instâncias clássicas da literatura, como as de Taillard.

Ao se estudar a classe de Programação da Produção, constata-se que os problemas *off-line* são muito mais estudados que aqueles *on-line*, devido à maior complexidade que este possui se comparado àquele, em razão da falta de conhecimento prévio acerca de aspectos relevantes quando do estudo da Programação da Produção, como tempos de processamento, datas de liberação, datas de entrega, entre outros.

No tangente ao modo de chegada dos itens, tem-se a prevalência dos modelos estáticos, se comparado aos dinâmicos, posto que a possibilidade de inserções e, ou, desistências de pedidos, ao longo da atividade de processamento dos itens, se por um lado, aproxima a teoria da prática, por outro, incrementa a complexidade de problemas, cujos modelos mais simples, *per se*, já são classificados, sob o prisma da complexidade computacional e algorítmica, como NP-difícil.

No tangente à natureza da geração de dados, tem-se equilíbrio entre os artigos que utilizam dados determinísticos e aqueles que fazem uso de elementos estocásticos. Em relação aos últimos, constata-se o emprego mais frequente de distribuições uniformes, menos complexas, do que as demais distribuições de probabilidade. No que concerne aos primeiros, constata-se a maior aplicação dessa natureza de dados em estudos construídos sob uma óptica mais teórica, especialmente aqueles que em algum momento contemplam a temática da complexidade de suas aplicações, geralmente de problemas com poucas estações de trabalho.

Dentre as características dos itens analisadas, constatou-se a predominância, de modo geral, da modelagem clássica, o que atesta, de modo inequívoco, a considerável lacuna entre o mundo teórico e o mundo real que, embora diminuída nos trabalhos mais recentes referentes ao *Shop Scheduling*, ainda persiste.

Respectivo aos critérios de otimalidade, o *makespan* foi, por larga margem, o objetivo mais tratado nos artigos analisados, pois existe em seu bojo a importância gerencial, correlata ao rendimento da programação ou sequência construída. Além disso, nota-se em trabalhos mais atuais o uso mais frequente de modelos multiobjetivos, analisados simultaneamente, ora concorrentes, ora hierárquicos entre si. A se destacar também, nesse tocante, os trabalhos que, por meio da simulação, trataram, de maneira independente, diversos objetivos.

Além disso, buscou-se apresentar, por meio de modelos matemáticos, outros aspectos que diferem do *status quo* vigente no *Shop Scheduling*, como características dos itens diversas da modelagem clássica, como modelos sem espera, critérios de otimalidade diversos do *makespan*, como a minimização da soma dos tempos quadráticos de conclusão, de ambientes fabris cuja natureza da geração de dados é estocástica, entre outros. Nesse tocante, constatou-se que a maioria dos artigos analisados não apresenta, ou pouco explicita, os modelos referentes aos problemas estudados.

Referentes aos tipos de métodos e métodos resolutivos propriamente ditos, tem-se a égide dos métodos heurísticos, que podem ser segmentados, basicamente, em autorais, cuja aplicação está restrita a artigos da alçada dos autores que propuseram tais métodos, das regras clássicas de sequenciamento, cujo emprego nos

artigos desse último quinquênio é, majoritariamente, relacionado a metodologias de solução inicial para métodos mais complexos. Além desses, há as heurísticas mais elaboradas, como a NEH, no caso do *Flow Shop* e do *Shifting Bottleneck*, no tangente ao *Job Shop*, que, em virtude de sua robustez e eficiência, foram aplicadas em muitos artigos além daqueles em que tais métodos foram propostos.

Em relação aos demais métodos, constatou-se um crescimento significativo nas últimas duas décadas, dos métodos meta-heurísticos e das hibridações. Em relação ao primeiro, destaca-se o emprego dos Algoritmos Genéticos e da Busca Tabu nos artigos estudados. Em relação ao segundo, as combinações de métodos, ao longo do período analisado, tem se tornado cada vez mais robustas, resolvendo à otimalidade instâncias difíceis da literatura, como a de Guéret e Prins.

Além dessas métricas, analisou-se também o espectro dos periódicos em que o *Shop Scheduling* está inserido. Nesse sentido, constatou-se que a temática é multifacetada, posto que os artigos coletados advieram dos mais variados campos do conhecimento, como a Matemática Aplicada, a Pesquisa Operacional, a Administração da Produção e Operações, a Engenharia, entre outras. Outrossim, há que se destacar, dentre o rol de periódicos de alto impacto e relevância em que o presente trabalho coletou os estudos a ser categorizados nas Revisões Sistemáticas realizadas, a EJOR, que foi aquela em que mais se encontrou estudos alusivos ao objeto de estudo desta dissertação.

Além da contribuição tangente à nova taxonomia de *Shop Scheduling* aqui proposta, o trabalho, de maneira inédita, trouxe à baila a representação em redes, confeccionadas com o auxílio do aplicativo Pajek, dos resultados obtidos quando da análise das métricas características dos itens, critérios de otimalidade, tipos de métodos resolutivos e métodos resolutivos. Tal representação contribuiu para se verificar a grande diversidade de componentes, sejam métodos resolutivos, objetivos que se visa a otimizar, etc., presentes quando do estudo desse tomo, ao passo que esta também auxilia a identificar a pronunciada concentração de artigos referentes a poucos componentes, como o *makespan*, em relação ao critério de otimalidade, ou ao método heurístico, no que concerne ao tipo de método. Tal análise traz, de modo subjacente, os *gaps* ou pontos pouco explorados no estudo do *Shop Scheduling*, algo entendido como mais uma contribuição que o presente trabalho possui.

Há que se ponderar, no tangente à análise em redes, alguns óbices identificados quando da construção destas. Tais dificuldades são correlatas à quantidade de informação que se pode apresentar nesses elementos, pois, em relação a algumas métricas, como métodos resolutivos, se teve que segmentar análise macro em várias micro-análises, de modo a facilitar a visualização e compreensão das informações nelas apresentadas. Além das redes, utilizou-se também os quadros-síntese, de modo a sumarizar toda a minuciosa e detalhada análise realizada em cada um dos ambientes componentes do *Shop Scheduling*, sob a perspectiva de cada uma das métricas, ora propostas, ora empregadas, com o propósito de apresentar uma nova e robusta taxonomia, que vem a complementar a taxonomia proposta por Graham.

Por fim, os direcionamentos futuros desse trabalho repousam no emprego da taxonomia proposta aos demais ambientes atinentes à Programação da Produção, que são o *Single Machine Shop* e o *Parallel Machine Shop*; na atualização das revisões sistemáticas aqui realizadas, de modo a construir um estado da arte mais atual e fidedigno, apresentando novas tendências concernentes ao *Shop Scheduling*; e a confecção de artigos científicos que contribuam para o maior desenvolvimento de aspectos pouco ou inexplorados na literatura, com o propósito de dirimir ainda mais a lacuna existente entre a teoria e a prática.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, M. H. A knowledge-based simulation model for job shop scheduling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 21, n. 7, p. 89–102, 1995.
- ABDELJAOUAD, M. A.; BAHROUN, Z.; OMRANE, A.; FONDREVELLE, J. Job-shop production scheduling with reverse flows. **European Journal of Operational Research**, v. 244, n. 1, p. 117–128, 2015.
- ABDELMAGUID, T. F. A neighborhood search function for flexible job shop scheduling with separable sequence-dependent setup times. **Applied Mathematics and Computation**, v. 260, p. 188–203, 2015.
- ABDELMAGUID, T. F. Permutation-induced acyclic networks for the job shop scheduling problem. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 3, p. 1560–1572, 2009.
- ABDOLLAHPOUR, S.; REZAEIAN, J. Minimizing makespan for flow shop scheduling problem with intermediate buffers by using hybrid approach of artificial immune system. **Applied Soft Computing**, v. 28, n.m., p. 44–56, 2015.
- ADAM, N. R.; BERTRAND, J. W. M.; MOREHEAD, D. C.; SURKIS, J. Due date assignment procedures with dynamically updated coefficients for multi-level assembly job shops. **European Journal of Operational Research**, v. 68, n. 2, p. 212–227, 1993.
- ADAMS, J.; BALAS, E.; ZAWACK, D. The Shifting Bottleneck Procedure for Job Shop Scheduling. **Management Science**, v. 34, n. 3, p. 391–401, 1988.
- ADIBI, M. A.; ZANDIEH, M.; AMIRI, M. Multi-objective scheduling of dynamic job shop using variable neighborhood search. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 282–287, 2010.
- ADIRI, I.; AMIT, N. Route-Dependent Open-Shop Scheduling. **IIE Transactions**, v. 15, n. 3, p. 231–234, 1983.
- ADIRI, I.; FROSTIG, E. A stochastic permutation-flowshop scheduling problem minimizing in distribution the schedule length. **Operations Research Letters**, v. 3, n. 2, p. 101–103, 1984.
- ADIRI, I.; POHORYLES, D. Flowshop No-Idle or No-Wait Scheduling To Minimize the Sum of Completion Times. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 29, n. 3, p. 495–504, 1982.
- AGNETIS, A.; FLAMINI, M.; NICOSIA, G.; PACIFICI, A. A job-shop problem with one additional resource type. **Journal of Scheduling**, v. 14, n. 3, p. 225–237, 2011.

- AHMADIZAR, F. A new ant colony algorithm for makespan minimization in permutation flow shops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 63, n. 2, p. 355–361, 2012.
- AKERS Jr, S.B; FRIEDMAN, J. A non-numerical approach to production scheduling problems. **Operations Research**, v. 3, n.m., p. 429-442, 1955.
- AKHSHABI, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; RAHNAMAY-ROODPOSHTI, F. A hybrid particle swarm optimization algorithm for a no-wait flow shop scheduling problem with the total flow time. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 5–8, p. 1181–1188, 2014.
- AL-ANZI, F. S.; ALLAHVERDI, A. Heuristics for a two-stage assembly flowshop with bicriteria of maximum lateness and makespan. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 9, p. 2682–2689, 2009.
- AL-ANZI, F. S.; SOTSKOV, Y. N.; ALLAHVERDI, A.; ANDREEV, G. V. Using mixed graph coloring to minimize total completion time in job shop scheduling. **Applied Mathematics and Computation**, v. 182, n. 2, p. 1137–1148, 2006.
- ALCAIDE, D.; RODRIGUEZ-GONZALEZ, A.; SICILIA, J. An approach to solve the minimum expected makespan flow-shop problem subject to breakdowns. **European Journal of Operational Research**, v. 140, n. 2, p. 384–398, 2002.
- AL-HINAI, N.; ELMEKKAWY, T. Y. Robust and stable flexible job shop scheduling with random machine breakdowns using a hybrid genetic algorithm. **International Journal of Production Economics**, v. 132, n. 2, p. 279–291, 2011.
- ALLAHVERDI, A. Stochastically minimizing total flowtime in flowshops with no waiting space. **European Journal of Operational Research**, v. 113, n. 1, p. 101–112, 1999.
- ALLAHVERDI, A.; SAVSAR, M. Stochastic proportionate flowshop scheduling with setups. **Computers & Industrial Engineering**, v. 39, n. 3, p. 357–369, 2001.
- ALLAHVERDI, A.; SOTSKOV, Y. Two-machine flowshop minimum-length scheduling problem with random and bounded processing times. **International Transactions in Operational Research**, v. 10, p. 65–76, 2003.
- ALLAHVERDI, A.; TATARI, M. F. Simulation of different rules in stochastic flowshops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 31, n. 1, p. 209–212, 1996.
- ALLHAVERDI, A.; NG, C.T.; CHENG, T.C.E.; KOVALYOV, M.Y. A survey of scheduling problems with setup times or costs. **European Journal of Operational Research**, v.187, n. 3, p. 985-1032, 2008.
- ALMEDER, C.; HARTL, R. F. A metaheuristic optimization approach for a real-world stochastic flexible flow shop problem with limited buffer. **International Journal of Production Economics**, v. 145, n. 1, p. 88–95, 2013.
- ALVAREZ-VALDES, R.; FUERTES, A.; TAMARIT, J. M.; GIMÉNEZ, G.; RAMOS, R. A heuristic to schedule flexible job-shop in a glass factory. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 2, p. 525–534, 2005.

AL-YAKOOB, S. M.; SHERALI, H. D. Mathematical models and algorithms for a high school timetabling problem. **Computers & Operations Research**, v. 61, p. 56-68, 2015.

AMICO, M. D.; TRUBIAN, M. Applying tabu search to the job-shop scheduling problem. **Annals of Operations Research**, v. 41, p. 231–252, 1993.

ANNAND, E.; PANNEERSELVAM, R. Literature Review of Open Shop Scheduling Problems. **Intelligent Information Management**, v. 7, n.m., p. 33-52, 2015.

APPLEGATE, D.; COOK, W. A computational study of the job-shop scheduling problem. **ORSA Journal on Computing**, v. 3, n. 2, p. 149–156, 1991.

ARMENTANO, V. A.; RONCONI, D. P. Tabu search for total tardiness minimization in flowshop scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 26, n. 3, p. 219–235, 1999.

ARORA, R. K.; RANA, S. P. Scheduling in a Semi-Ordered Flow-shop Without Intermediate Queues. **A I I E Transactions**, v. 12, n. 3, p. 263–272, 1980.

ARTIGUES, C.; FEILLET, D. A branch and bound method for the job-shop problem with sequence-dependent setup times. **Annals of Operations Research**, v. 159, n. 1, p. 135–159, 2008.

ARTIGUES, C.; ROUBELLAT, F. Real-Time Workshop Scheduling. In: LOPEZ, P.; ROUBELLAT, F. (Eds.). **Production Scheduling**. New York: Wiley, 2008. p. 333-362.

ASANO, M.; OHTA, H. A heuristic for job shop scheduling to minimize total weighted tardiness. **Computers & Industrial Engineering**, v. 42, n. 2–4, p. 137–147, 2002.

ASHOUR, S. A Branch-and-Bound Algorithm for Flow Shop Scheduling Problems. **A I I E Transactions**, v. 2, n. 2, p. 172–176, 1970.

AVERBAKH, I. The minmax regret permutation flow-shop problem with two jobs. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 3, p. 761–766, 2006.

AVERBAKH, I.; BERMAN, O. A Simple Heuristic for m-Machine Flow-Shop and its Applications in Routing-Scheduling Problems. **Operations Research**, v. 47, n. 1, p. 165–170, 1999.

AVOUAC, J.; GOSSEC, L.; DOUGADOS, M. Diagnostic and predictive value of anti-cyclic citrullinated protein antibodies in rheumatoid arthritis: a systematic literature review. **Annals of Rheumatic Diseases**, v. 65, n. 7, p. 845-851, 2006.

AYDILEK, H.; ALLAHVERDI, A. A polynomial time heuristic for the two-machine flowshop scheduling problem with setup times and random processing times. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 12, p. 7164–7173, 2013.

AYDILEK, H.; ALLAHVERDI, A. Heuristics for no-wait flowshops with makespan subject to mean completion time. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, n. 1, p. 351–359, 2012.

- AZADEH, A.; FARAHANI, M. H.; KALANTARI, S. S.; ZARRIN, M. Solving a multi-objective open shop problem for multi-processors under preventive maintenance. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 707–722, 2015.
- AZIM, M. A.; MORAS, R. G.; SMITH, M. L. Antithetic sequence in flow shop scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, v. 17, n. 1, p. 353–358, 1989.
- AZIZOĞLU, M. Preemptive scheduling on identical parallel machines subject to deadlines. **European Journal of Operational Research**, v. 148, n. 1, p. 205–210, 2003.
- AZIZOĞLU, M.; ÇAKMAK, E.; KONDAKCI, S. A flexible flowshop problem with total flow time minimization. **European Journal of Operational Research**, v. 132, n. 3, p. 528–538, 2001.
- BAI, D.; TANG, L. Open shop scheduling problem to minimize makespan with release dates. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 4, p. 2008–2015, 2013.
- BAKER, K. R. Lot streaming in the two-machine flow shop with setup times. **Annals of Operations Research**, v. 57, n. 1, p. 1–11, 1995.
- BAKER, K. R. Sequencing Rules and Due-Date Assignments in a Job Shop. **Management Science**, v. 30, n. 9, p. 1093–1104, 1984.
- BAKER, K. R.; KANET, J. J. Job shop scheduling with modified due dates. **Journal of Operations Management**, v. 4, n. 1, p. 11–22, 1983.
- BAKER, K.R.; TRIETSCH, D. **Principles of Sequencing and Scheduling**. New York: Wiley, 2009.
- BALAS, E.; VAZACOPOULOS, A. Guided local search with shifting bottleneck for job shop scheduling. **Management Science**, v. 44, n. 2, p. 262–275, 1998.
- BARNES, J. W.; CHAMBERS, J. B. Solving the Job Shop Scheduling Problem With Tabu Search. **IIE Transactions**, v. 27, n. 2, p. 257–263, 1995.
- BEHNAMIAN, J.; FATEMI GHOMI, S. M. T. Hybrid flowshop scheduling with machine and resource-dependent processing times. **Applied Mathematical Modelling**, v. 35, n. 3, p. 1107–1123, 2011.
- BEHNAMIAN, J.; ZANDIEH, M. A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 12, p. 14490–14498, 2011.
- BENAVIDES, A. J.; RITT, M.; MIRALLES, C. Flow shop scheduling with heterogeneous workers. **European Journal of Operational Research**, v. 237, n. 2, p. 713–720, 2014.
- BEN-DAYA, M.; AL-FAWZAN, M. A tabu search approach for the flow shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 109, n. 1, p. 88–95, 1998.

BERTSIMAS, D.; GAMARNIK, D.; SETHURAMAN, J. From Fluid Relaxations to Practical Algorithms for High-Multiplicity Job-Shop Scheduling: The Holding Cost Objective. **Operations Research**, v. 51, n. 5, p. 798–813, 2003.

BIRGIN, E. G.; FERREIRA, J. E.; RONCONI, D. P. List scheduling and beam search methods for the flexible job shop scheduling problem with sequencing flexibility. **European Journal of Operational Research**, v. 247, n. 2, p. 421–440, 2015.

BLAZEWICZ, J.; ECKER, K.H.; PESCH, E.; SCHMIDT, G.; WEGLARZ, J. **Scheduling Computer and Manufacturing Processes**. 2. ed. New York: Springer, 2001.

BLAZEWICZ, J.; LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. **Discrete Applied Mathematics**, v. 5, n. 1, p. 11–24, 1983.

BLAZEWICZ, J.; PESCH, E.; STERNA, M.; WERNER, F. A note on the two machine job shop with the weighted late work criterion. **Journal of Scheduling**, v. 10, n. 2, p. 87–95, 2007.

BŁAŻEWICZ, J.; PESCH, E.; STERNA, M.; WERNER, F. The two-machine flow-shop problem with weighted late work criterion and common due date. **European Journal of Operational Research**, v. 165, n. 2, p. 408–415, 2005.

BLUM, C. Beam-ACO—hybridizing ant colony optimization with beam search: an application to open shop scheduling. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 6, p. 1565–1591, 2005.

BOCHTIS, D. D.; DOGOULIS, P.; BUSATO, P.; et al. A flow-shop problem formulation of biomass handling operations scheduling. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 91, p. 49–56, 2013.

BOUDOUKH, T.; PERM, M.; WEISS, G. Scheduling jobshops with some identical or similar jobs. **Journal of Scheduling**, v. 4, n. 4, p. 177–199, 2001.

BOUQUARD, J.-L.; BILLAUT, J.-C.; KUBZIN, M. A.; STRUSEVICH, V. A. Two-machine flow shop scheduling problems with no-wait jobs. **Operations Research Letters**, v.33, n.3, p.255–262, 2005.

BOXMA, O. J.; FORST, F. G. Minimizing the expected weighted number of tardy jobs in stochastic flow shops. **Operations Research Letters**, v. 5, n. 3, p. 119–126, 1986.

BOŻEJKO, W.; MAKUCHOWSKI, M. A fast hybrid tabu search algorithm for the no-wait job shop problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 4, p. 1502–1509, 2009.

BOŻEJKO, W.; PEMPERA, J.; SMUTNICKI, C. Parallel tabu search algorithm for the hybrid flow shop problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 3, p. 466–474, 2013.

BOZOKI, G.; RICHARD, J.-P. A Branch-and-Bound Algorithm for the Continuous-Process Job-Shop Scheduling Problem. **IIE Transactions**, v. 2, n. 3, p. 246–252, 1970.

BRANDIMARTE, P. Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search. **Annals of Operations Research**, v. 41, n. 3, p. 157–183, 1993.

BRÄSEL, H.; KLUGE, D.; WERNER, F. A polynomial algorithm for the $[n/m/0/t_{ij}=1, \text{tree}/C_{\max}]$ open shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 72, p. 125–134, 1994.

BRUCKER, P.; JURISCH, B.; TAUTENHAHN, T.; WERNER, F. Scheduling unit time open shops to minimize the weighted number of late jobs. **Operations Research Letters**, v. 14, n. 5, p. 245–250, 1993.

BRUCKER, P.; KAMPMEYER, T. Cyclic job shop scheduling problems with blocking. **Annals of Operations Research**, v. 159, n. 1, p. 161–181, 2007.

BRUCKER, P.; SCHLIE, R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines. **Computing**, v. 45, n. 4, p. 369–375, 1990.

BÜLBÜL, K.; KAMINSKY, P. A linear programming-based method for job shop scheduling. **Journal of Scheduling**, v. 16, n. 2, p. 161–183, 2013.

BULFIN, R. L.; M'HALLAH, R. Minimizing the weighted number of tardy jobs on a two-machine flow shop. **Computers & Operations Research**, v. 30, n. 12, p. 1887–1900, 2003.

BURNS, F.; ROOKER, J. A Special Case of the $3 \times n$ FLOW SHOP PROBLEM. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 22, 1975.

BUZACOTT, J. A.; SHANTHIKUMAR, J. G. On Approximate Queueing Models of Dynamic Job Shops. **Management Science**, v. 31, n. 7, p. 870–887, 1985.

CAFFREY, J.; HITCHINGS, G. Makespan distributions in flow shop scheduling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 15, n. 3, p. 50–58, 1995.

CARLIER, J.; PINSON, E. An Algorithm for Solving the Job-Shop Problem. **Management Science**, v. 35, n. 2, p. 164–176, 1989.

CAUMOND, A.; LACOMME, P.; TCHERNEV, N. A memetic algorithm for the job-shop with time-lags. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 7, p. 2331–2356, 2008.

CAVORY, G.; DUPAS, R.; GONCALVES, G. A genetic approach to solving the problem of cyclic job shop scheduling with linear constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 161, n. 1, p. 73–85, 2005.

ČEPEK, O.; OKADA, M.; VLACH, M. Nonpreemptive flowshop scheduling with machine dominance. **European Journal of Operational Research**, v. 139, n. 2, p. 245–261, 2002.

ČEPEK, O.; VLACH, M.; DE WERRA, D. Nonpreemptive open shop with restricted processing times. **Methods and Models of Operations Research**, v. 39, n. 2, p. 227–241, 1994.

- CHAN, F. T. S.; CHOY, K. L.; BIBHUSHAN. A genetic algorithm-based scheduler for multiproduct parallel machine sheet metal job shop. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 7, p. 8703–8715, 2011.
- CHANDRA, P.; MEHTA, P.; TIRUPATI, D. Permutation flow shop scheduling with earliness and tardiness penalties. **International Journal of Production Research**, v. 47, n. 20, p. 5591–5610, 2009.
- CHANG, P.-C.; HUANG, W.-H.; WU, J.-L.; CHENG, T. C. E. A block mining and re-combination enhanced genetic algorithm for the permutation flowshop scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 45–55, 2013.
- CHEN, B.; MATIS, T. I. A flexible dispatching rule for minimizing tardiness in job shop scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 360–365, 2013.
- CHEN, B.; POTTS, C.N; WOEGINGER, G.J. A review of machine scheduling: Complexity, algorithms and Applications. In: DU, D-Z.; PARDALOS, P.M. (Eds.). **Handbook of Combinatorial Optimization**. Dordrecht: Kluwer, 1998. p. 21-169.
- CHEN, B.; VESTJENS, A. P. A.; WOEGINGER, G. J. On-line scheduling of two-machine open shops where jobs arrive over time. **Journal of Combinatorial Optimization**, v. 1, p. 355–365, 1997.
- CHEN, C.-L.; NEPPALLI, R. V.; ALJABER, N. Genetic algorithms applied to the continuous flow shop problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 30, n. 4, p. 919–929, 1996.
- CHEN, C.-L.; TZENG, Y.-R.; CHEN, C.-L. A new heuristic based on local best solution for permutation flow shop scheduling. **Applied Soft Computing**, v. 29, p. 75–81, 2015.
- CHEN, H.; LUH, P. B. An alternative framework to Lagrangian relaxation approach for job shop scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 149, n. 3, p. 499–512, 2003.
- CHEN, J. C.; WU, C.-C.; CHEN, C.-W.; CHEN, K.-H. Flexible job shop scheduling with parallel machines using Genetic Algorithm and Grouping Genetic Algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 11, p. 10016–10021, 2012.
- CHEN, J. S. A branch and bound procedure for the reentrant permutation flow-shop scheduling problem. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 29, n. 11–12, p. 1186–1193, 2006.
- CHEN, J.; STEINER, G. Lot streaming with attached setups in three-machine flow shops. **IIE Transactions**, v. 30, n. 11, p. 1075–1084, 1998.
- CHEN, J.-S.; PAN, J. C.-H.; LIN, C.-M. A hybrid genetic algorithm for the re-entrant flow-shop scheduling problem. **Expert Systems with Applications**, v. 34, n. 1, p. 570–577, 2008.

- CHEN, J.-S.; PAN, J. C.-H.; WU, C.-K. Hybrid tabu search for re-entrant permutation flow-shop scheduling problem. **Expert Systems with Applications**, v. 34, n. 3, p. 1924–1930, 2008.
- CHENG, H.-C.; CHIANG, T.-C.; FU, L.-C. A two-stage hybrid memetic algorithm for multiobjective job shop scheduling. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 9, p. 10983–10998, 2011.
- CHENG, M.; TADIKAMALLA, P. R.; SHANG, J.; ZHANG, S. Bicriteria hierarchical optimization of two-machine flow shop scheduling problem with time-dependent deteriorating jobs. **European Journal of Operational Research**, v. 234, n. 3, p. 650–657, 2014.
- CHENG, T. C. E.; JIANG, J. Job shop scheduling for missed due-date performance. **Computers & Industrial Engineering**, v. 34, n. 2, p. 297–307, 1998.
- CHENG, T. C. E.; LIN, B. M. T.; HUANG, H. L. Resource-constrained flowshop scheduling with separate resource recycling operations. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 6, p. 1206–1212, 2012.
- CHENG, T. C. E.; NONG, Q.; NG, C. T. Polynomial-Time Approximation Scheme for Concurrent Open Shop Scheduling with a Fixed Number of Machines to Minimize the Total Weighted Completion Time. **Naval Research Logistics**, v. 58, p. 763–770, 2011.
- CHENG, T. C. E.; PENG, B.; LÜ, Z. A hybrid evolutionary algorithm to solve the job shop scheduling problem. **Annals of Operations Research**, 2013.
- CHENG, T. C. E.; SHAKHLEVICH, N. Proportionate flow shop with controllable processing times. **Journal of Scheduling**, v. 2, n. 6, p. 253–265, 1999.
- CHENG, T. C. E.; SRISKANDARAJAH, C.; WANG, G. Q. Two- and three-stage flowshop scheduling with no-wait in process. **Production and Operations Management**, v. 9, n. 4, p. 367–378, 2000.
- CHENG, T.C.E.; SIN, C.C.S. A state-of-the-art-review of Parallel-machine scheduling research. **European Journal of Operational Research**, v. 47, n. 3, 271-292, 1990.
- CHEUNG, W.; ZHOU, H. Using Genetic Algorithms and Heuristics for Job Shop Scheduling with Sequence-Dependent Setup Times. **Annals of Operations Research**, v. 107, n. 1–4, p. 65–81, 2001.
- CHIANG, T.-C.; LIN, H.-J. A simple and effective evolutionary algorithm for multiobjective flexible job shop scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 87–98, 2013.
- CHING-JONG LIAO; CHIEN-LIN SUN; WEN-CHING YOU. Flow-shop scheduling with flexible processors. **Computers & Operations Research**, v. 22, n. 3, p. 297–306, 1995.
- CHIOU, C.-W.; CHEN, W.-M.; LIU, C.-M.; WU, M.-C. A genetic algorithm for scheduling dual flow shops. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 1, p. 1306–1314, 2012.

- CHOI, H.-S.; LEE, D.-H. Scheduling algorithms to minimize the number of tardy jobs in two-stage hybrid flow shops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 1, p. 113–120, 2009.
- CHOI, I.; KORKMAZ, O. Job shop scheduling with separable sequence-dependent setups. **Annals of Operations Research**, v. 70, p. 155–170, 1997.
- CHOI, S.-W.; KIM, Y.-D. Minimizing total tardiness on a two-machine re-entrant flowshop. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 2, p. 375–384, 2009.
- CHOU, F.-D. Particle swarm optimization with cocktail decoding method for hybrid flow shop scheduling problems with multiprocessor tasks. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 137–145, 2013.
- CHUNG, C.-S.; FLYNN, J.; KIRCA, O. A branch and bound algorithm to minimize the total flow time for m-machine permutation flowshop problems. **International Journal of Production Economics**, v. 79, n. 3, p. 185–196, 2002.
- CHUNG, C.-S.; FLYNN, J.; KIRCA, Ö. A branch and bound algorithm to minimize the total tardiness for m-machine permutation flowshop problems. **European Journal of Operational Research**, v. 174, n. 1, p. 1–10, 2006.
- CHUNG, C.-S.; MOHANTY, B. B. Minimizing expected makespan in a two-machine stochastic open shop with Poisson arrival. **Journal of Mathematical Analysis and Applications**, v. 133, n. 2, p. 498–508, 1988.
- CHUNG, T.-P.; LIAO, C.-J. An immunoglobulin-based artificial immune system for solving the hybrid flow shop problem. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 8, p. 3729–3736, 2013.
- CONWAY, R.W.; MAXWELL, W.L.; MILLER, L.W. **Theory of Scheduling**. Reading: Addison-Wesley, 1967.
- CORWIN, B. D.; ESOGBUE, A. O. Two machine flow shop scheduling problems with sequence dependent setup times: A dynamic programming approach. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 21, n. 3, p. 515–524, 1974.
- CRUZ-CHÁVEZ, M. A.; MARTÍNEZ-RANGEL, M. G.; CRUZ-ROSALES, M. H. Accelerated simulated annealing algorithm applied to the flexible job shop scheduling problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 0, p. 1–19, 2015.
- CUNNINGHAM, A. A.; DUTTA, S. K. Scheduling Jobs With Exponentially Distributed Processing Times on Two Machines Of a Flow Shop. **Naval Research Logistics**, v. 20, n. 1, p. 69–81, 1973.
- CZAPIŃSKI, M. Parallel Simulated Annealing with Genetic Enhancement for flowshop problem with Csum. **Computers & Industrial Engineering**, v. 59, n. 4, p. 778–785, 2010.
- DAI, J. G.; WEISS, G. A Fluid Heuristic for Minimizing Makespan in Job Shops. **Operations Research**, v. 50, n. 4, p. 692–707, 2002.

DANIELS, R. L.; CHAMBERS, R. J. Multiobjective flow-shop scheduling. **Naval Research Logistics**, v. 37, n. 6, p. 981–995, 1990.

DANIELS, R. L.; MAZZOLA, J. B. A tabu-search heuristic for the flexible-resource flow shop scheduling problem. **Annals of Operations Research**, v. 41, n. 3, p. 207–230, 1993.

DANIELS, R. L.; MAZZOLA, J. B. Flow Shop Scheduling with Resource Flexibility. **Operations Research**, v. 42, n. 3, p. 504–522, 1994.

DANIELS, R. L.; MAZZOLA, J. B.; SHI, D. Flow Shop Scheduling with Partial Resource Flexibility. **Management Science**, v. 50, n. 5, p. 658–669, 2004.

DANNENBRING, D. G. An Evaluation of Flow Shop Sequencing Heuristics. **Management Science**, v. 23, n. 11, p. 1174–1182, 1977.

DASGUPTA, P.; DAS, S. A Discrete Inter-Species Cuckoo Search for flowshop scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 60, p. 111–120, 2015.

DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; PAULLI, J. An integrated approach for modeling and solving the general multiprocessor job-shop scheduling problem using tabu search. **Annals of Operations Research**, v. 70, n. 0, p. 281–306, 1997.

DAVOUDPOUR, H.; ASHRAFI, M. Solving multi-objective SDST flexible flow shop using GRASP algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, n. 7–8, p. 737–747, 2009.

DE BONTRIDDER, K. M. J. Minimizing total weighted tardiness in a generalized job shop. **Journal of Scheduling**, v. 8, n. 6, p. 479–496, 2005.

DE GIOVANNI, L.; PEZZELLA, F. An Improved Genetic Algorithm for the Distributed and Flexible Job-shop Scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 2, p. 395–408, 2010.

DE WERRA, D.; BŁAŻEWICZ, J.; KUBIAK, W. A preemptive open shop scheduling problem with one resource. **Operations Research Letters**, v. 10, n. 1, p. 9–15, 1991.

DECKRO, R. F.; HEBERT, J. E.; WINKOFSKY, E. P. Multiple criteria job-shop scheduling. **Computers & Operations Research**, v. 9, n. 4, p. 279–285, 1982.

DELLA CROCE, F.; GHIRARDI, M.; TADEI, R. An improved branch-and-bound algorithm for the two machine total completion time flow shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 139, n. 2, p. 293–301, 2002.

DELLA CROCE, F.; GROSSO, A.; SALASSA, F. A matheuristic approach for the two-machine total completion time flow shop problem. **Annals of Operations Research**, v. 213, n. 1, p. 67–78, 2014.

DELLA CROCE, F.; GUPTA, J. N. .; TADEI, R. Minimizing tardy jobs in a flowshop with common due date. **European Journal of Operational Research**, v. 120, n. 2, p. 375–381, 2000.

- DELLA CROCE, F.; NARAYAN, V.; TADEI, R. The two-machine total completion time flow shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 90, n. 2, p. 227–237, 1996.
- DELLA CROCE, F.; TADEI, R.; VOLTA, G. A genetic algorithm for the job shop problem. **Computers & Operations Research**, v. 22, n. 1, p. 15–24, 1995.
- DEMO, P. **Introdução à metodologia da ciência**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1985.
- DENG, G.; GU, X. A hybrid discrete differential evolution algorithm for the no-idle permutation flow shop scheduling problem with makespan criterion. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 9, p. 2152–2160, 2012.
- DOLGUI, A.; GORDON, V.; STRUSEVICH, V. Single machine scheduling with precedence constraints and positionally dependent processing times. **Computers & Operations Research**, v. 39, n.m., p. 1218–1224, 2012.
- DONG, X.; CHEN, P.; HUANG, H.; NOWAK, M. A multi-restart iterated local search algorithm for the permutation flow shop problem minimizing total flow time. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 2, p. 627–632, 2013.
- DONG, X.; NOWAK, M.; CHEN, P.; LIN, Y. Self-adaptive perturbation and multi-neighborhood search for iterated local search on the permutation flow shop problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 87, p. 176–185, 2015.
- DORNDORF, U.; PESCH, E. Evolution based learning in a job shop scheduling environment. **Computers & Operations Research**, v. 22, n. 1, p. 25–40, 1995.
- DOULABI, S. H. H.; AVAZBEIGI, M.; ARAB, S.; DAVOUDPOUR, H. An effective hybrid simulated annealing and two mixed integer linear formulations for just-In-Time open shop scheduling problem. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, n. 9–12, p. 1143–1155, 2012.
- DROBOUCHEVITCH, I. G.; STRUSEVICH, V. A. A polynomial algorithm for the three-machine open shop with a bottleneck machine. **Annals of Operations Research**, v. 92, p. 185–210, 1999.
- EASWARAN, G.; PARTEN, L. E.; MORAS, R.; UHLIG, P. X. Makespan minimization in machine dominated flowshop. **Applied Mathematics and Computation**, v. 217, n. 1, p. 110–116, 2010.
- EBADI, A.; MOSLEHI, G. An optimal method for the preemptive job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 5, p. 1314–1327, 2013.
- ELALOUF, A.; LEVNER, E.; TANG, H. An improved FPTAS for maximizing the weighted number of just-in-time jobs in a two-machine flow shop problem. **Journal of Scheduling**, v. 16, n. 4, p. 429–435, 2013.
- EL-BOURI, A. A cooperative dispatching approach for minimizing mean tardiness in a dynamic flowshop. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 7, p. 1305–1314, 2012.

EL-BOURI, A.; AZIZI, N.; ZOLFAGHARI, S. A comparative study of a new heuristic based on adaptive memory programming and simulated annealing: The case of job shop scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 3, p. 1894–1910, 2007.

ELVERS, D. A.; TAUBE, L. R. Deterministic/stochastic assumptions in job shops. **European Journal of Operational Research**, v. 14, n. 1, p. 89–94, 1983.

ELVERS, D. A.; TAUBE, L. R. Time completion for various dispatching rules in job shops. **Omega**, v. 11, n. 1, p. 81–89, 1983.

ELYASI, A.; SALMASI, N. Stochastic flow-shop scheduling with minimizing the expected number of tardy jobs. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 66, n. 1–4, p. 337–346, 2013.

ENGİN, O.; CERAN, G.; YILMAZ, M. K. An efficient genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problems. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 3, p. 3056–3065, 2011.

EREN, T.; GÜNER, E. A bicriteria flowshop scheduling problem with setup times. **Applied Mathematics and Computation**, v. 183, n. 2, p. 1292–1300, 2006.

ESPINOUSE, M. L.; FORMANOWICZ, P.; PENZ, B. Minimizing the makespan in the two-machine no-wait flow-shop with limited machine availability. **Computers & Industrial Engineering**, v. 37, n. 1, p. 497–500, 1999.

ESQUIROL, P.; LOPEZ, P. Basic Concepts and Methods in Production Scheduling. In: LOPEZ, P.; ROUBELLAT, F. (Eds.). **Production Scheduling**. New York: Wiley, 2008. p. 5–32.

ESQUIVEL, S.; FERRERO, S.; GALLARD, R.; et al. Enhanced evolutionary algorithms for single and multiobjective optimization in the job shop scheduling problem. **Knowledge-Based Systems**, v. 15, n. 1, p. 13–25, 2002.

ESSAFI, I.; MATI, Y.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S. A genetic local search algorithm for minimizing total weighted tardiness in the job-shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 8, p. 2599–2616, 2008.

EWACHA, K.; RIVAL, I.; STEINER, G. Permutation Schedules for Flow Shops with Precedence Constraints. **Operations Research**, v. 38, n. 6, p. 1135–1139, 1990.

FANG, J.; XI, Y. A rolling horizon job shop rescheduling strategy in the dynamic environment. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 13, n. 3, p. 227–232, 1997.

FATTAHI, P.; JOLAI, F.; ARKAT, J. Flexible job shop scheduling with overlapping in operations. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 7, p. 3076–3087, 2009.

FERNANDEZ-VIAGAS, V.; FRAMINAN, J. M. Efficient non-population-based algorithms for the permutation flowshop scheduling problem with makespan minimisation subject to a maximum tardiness. **Computers & Operations Research**, v. 64, p. 86–96, 2015a.

FERNANDEZ-VIAGAS, V.; FRAMINAN, J. M. NEH-based heuristics for the permutation flowshop scheduling problem to minimise total tardiness. **Computers & Operations Research**, v. 60, p. 27–36, 2015b.

FERNANDEZ-VIAGAS, V.; FRAMINAN, J. M. On insertion tie-breaking rules in heuristics for the permutation flowshop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 45, p. 60–67, 2014.

FIGIELSKA, E. A genetic algorithm and a simulated annealing algorithm combined with column generation technique for solving the problem of scheduling in the hybrid flowshop with additional resources. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 1, p. 142–151, 2009.

FOLEY, R. D.; SURESH, S. Scheduling nonoverlapping jobs and two stochastic jobs in a flow shop. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 33, n. 1, p. 123–128, 1986.

FOLEY, R. D.; SURESH, S. Stochastically Minimizing the Makespan in Flow Shops. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 31, p. 551–557, 1984.

FONDREVELLE, J.; OULAMARA, A.; PORTMANN, M.-C. Permutation flowshop scheduling problems with time lags to minimize the weighted sum of machine completion times. **International Journal of Production Economics**, v. 112, n. 1, p. 168–176, 2008.

FORST, F. G. Minimizing total expected costs in the two-machine, stochastic flow shop. **Operations Research Letters**, v. 2, n. 2, p. 58–61, 1983.

FRAMINAN, J. M.; LEISTEN, R.; RUIZ-USANO, R. Efficient heuristics for flowshop sequencing with the objectives of makespan and flowtime minimisation. **European Journal of Operational Research**, v. 141, n. 3, p. 559–569, 2002.

FRAMINAN, J. M.; PEREZ-GONZALEZ, P. On heuristic solutions for the stochastic flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 246, n. 2, p. 413–420, 2015.

FRAMINAN, J. M.; SCHUSTER, C. An enhanced timetabling procedure for the no-wait job shop problem: a complete local search approach. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 5, p. 1200–1213, 2006.

FRIEZE, A. M.; YADEGAR, J. A new integer programming formulation for the permutation flowshop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 40, n. 1, p. 90–98, 1989.

FROSTIG, E. On the optimality of static policy in stochastic open shop. **Operations Research Letters**, v. 10, n. 9, p. 509–512, 1991.

FROSTIG, E.; ADIRI, I. Three-Machine Flowshop Stochastic Scheduling to Minimize Distribution of Schedule Length *. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 32, p. 179–183, 1985.

GALAMBOS, G.; WOEGINGER, G. J. Minimizing the weighted number of late jobs in UET open shops. **Mathematical Methods of Operations Research**, v. 41, n. 1, p. 109–114, 1995.

GANGADHARAN, R.; RAJENDRAN, C. A simulated annealing heuristic for scheduling in a flowshop with bicriteria. **Computers & Industrial Engineering**, v. 27, n. 1, p. 473–476, 1994.

GAO, J.; GEN, M.; SUN, L.; ZHAO, X. A hybrid of genetic algorithm and bottleneck shifting for multiobjective flexible job shop scheduling problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, n. 1, p. 149–162, 2007.

GAO, J.; SUN, L.; GEN, M. A hybrid genetic and variable neighborhood descent algorithm for flexible job shop scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 9, p. 2892–2907, 2008.

GAO, K. Z.; PAN, Q. K.; LI, J. Q. Discrete harmony search algorithm for the no-wait flow shop scheduling problem with total flow time criterion. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 56, n. 5–8, p. 683–692, 2011.

GAO, K. Z.; SUGANTHAN, P. N.; TASGETIREN, M. F.; PAN, Q. K.; SUN, Q. Q. Effective ensembles of heuristics for scheduling flexible job shop problem with new job insertion. **Computers & Industrial Engineering**, v. 90, p. 107–117, 2015.

GAO, K.; PAN, Q.; SUGANTHAN, P. N.; LI, J. Effective heuristics for the no-wait flow shop scheduling problem with total flow time minimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 66, n. 9–12, p. 1563–1572, 2013.

GEORGIADIS, P.; MICHALOUDIS, C. Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 216, n. 1, p. 94–104, 2012.

GERSTL, E.; MOSHEIOV, G. A two-stage flexible flow shop problem with unit-execution-time jobs and batching. **International Journal of Production Economics**, v. 158, p. 171–178, 2014.

GERSTL, E.; MOSHEIOV, G. A two-stage flow shop batch-scheduling problem with the option of using Not-All-Machines. **International Journal of Production Economics**, v. 146, n. 1, p. 161–166, 2013.

GIM, B.; CURRY, G. L.; DEUERMEYER, B. L. Two-machine flow-shop sequencing with sparse precedence constraints. **Computers & Industrial Engineering**, v. 26, n. 1, p. 173–180, 1994.

GLASS, C. A.; POTTS, C. N. A comparison of local search methods for flow shop scheduling. **Annals of Operations Research**, v. 63, n. 4, p. 489–509, 1996.

GOLDANSAZ, S. M.; JOLAI, F.; ZAHEDI ANARAKI, A. H. A hybrid imperialist competitive algorithm for minimizing makespan in a multi-processor open shop. **Applied Mathematical Modelling**, v. 37, n. 23, p. 9603–9616, 2013.

GOLENKO-GINZBURG, D.; GONIK, A. Optimal job-shop scheduling with random operations and cost objectives. **International Journal of Production Economics**, v. 76, n. 2, p. 147–157, 2002.

- GOLENKO-GINZBURG, D.; KESLER, S.; LANDSMAN, Z. Industrial job-shop scheduling with random operations and different priorities. **International Journal of Production Economics**, v. 40, n. 2, p. 185–195, 1995.
- GONÇALVES, J. F.; DE MAGALHÃES MENDES, J. J.; RESENDE, M. G. C. A hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 167, n. 1, p. 77–95, 2005.
- GONCHAROV, Y.; SEVASTYANOV, S. The flow shop problem with no-idle constraints: A review and approximation. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 450–456, 2009.
- GONG, H.; TANG, L. Two-machine flowshop scheduling with intermediate transportation under job physical space consideration. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 9, p. 1267–1274, 2011.
- GONG, H.; TANG, L.; DUIN, C. W. A two-stage flow shop scheduling problem on a batching machine and a discrete machine with blocking and shared setup times. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 5, p. 960–969, 2010.
- GONZÁLEZ, M. A.; ODDI, A.; RASCONI, R.; VARELA, R. Scatter search with path relinking for the job shop with time lags and setup times. **Computers & Operations Research**, v. 60, p. 37–54, 2015.
- GONZALEZ, T.; SAHNI, S. Open Shop Scheduling to Minimize Finish Time. **Journal of the ACM**, v. 23, n. 4, p. 665–679, 1976.
- GOREN, S.; SABUNCUOGLU, I.; KOC, U. Optimization of Schedule Stability and Efficiency Under Processing Time Variability and Random Machine Breakdowns in a Job Shop Environment. **Naval Research Logistics**, v. 59, p. 26–38, 2012.
- GRABOWSKI, J.; JANIĄK, A. Job-shop scheduling with resource-time models of operations. **European Journal of Operational Research**, v. 28, n. 1, p. 58–73, 1987.
- GRABOWSKI, J.; PEMPERA, J. Some local search algorithms for no-wait flow-shop problem with makespan criterion. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 8, p. 2197–2212, 2005.
- GRABOWSKI, J.; PEMPERA, J. The permutation flow shop problem with blocking. A tabu search approach. **Omega**, v. 35, n. 3, p. 302–311, 2007.
- GRAHAM, R.L.; E.L. LAWLER.; LENSTRA, J.K.; RINNOOY KAN, A.H.G. Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. **Annals of Discrete Mathematics**, v. 5, p. 287–326, 1979.
- GRAVEL, M.; MARTEL, J. M.; NADEAU, R.; PRICE, W.; TREMBLAY, R. A multicriterion view of optimal resource allocation in job-shop production. **European Journal of Operational Research**, v. 61, n. 1, p. 230–244, 1992.
- GRAVES, S. C.; MEAL, H. C.; STEFEK, D.; ZEGHMI, A. H. Scheduling of re-entrant flow shops. **Journal of Operations Management**, v. 3, n. 4, p. 197–207, 1983.

- GRAVES, S.C. A Review of Production Scheduling. **Operations Research**, v. 29, n. 4, p. 646-675, 1981.
- GRIBKOVSKAIA, I. V.; LEE, C.-Y.; STRUSEVICH, V. A.; DE WERRA, D. Three is easy, two is hard: open shop sum-batch scheduling problem refined. **Operations Research Letters**, v. 34, n. 4, p. 459–464, 2006.
- GRÖFLIN, H.; KLINKERT, A. Feasible insertions in job shop scheduling, short cycles and stable sets. **European Journal of Operational Research**, v. 177, n. 2, p. 763–785, 2007.
- GROMICHO, J. A. S.; VAN HOORN, J. J.; SALDANHA-DA-GAMA, F.; TIMMER, G. T. Solving the job-shop scheduling problem optimally by dynamic programming. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 12, p. 2968–2977, 2012.
- GU, J.; GU, M.; CAO, C.; GU, X. A novel competitive co-evolutionary quantum genetic algorithm for stochastic job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 5, p. 927–937, 2010.
- GUÉRET, C.; PRINS, C. Classical and new heuristics for the open-shop problem: A computational evaluation. **European Journal of Operational Research**, v. 107, n. 2, p. 306–314, 1998.
- GUPTA, J. N. D. A search algorithm for the generalized flowshop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 2, n. 2, p. 83–90, 1975.
- GUPTA, J. N. D. An improved lexicographic search algorithm for the flowshop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 6, n. 2, p. 117-120, 1979.
- GUPTA, J. N. D.; DARROW, W. P. The two-machine sequence dependent flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 3, p. 439–446, 1986.
- GUPTA, J. N. D.; KOULAMAS, C. P.; KYPARISIS, G. J.; POTTS, C. N.; STRUSEVICH, V. A. Scheduling three-operation jobs in a two-machine flow shop to minimize makespan: Models and algorithms for planning and scheduling problems. **Annals of Operations Research**, v. 129, p. 171–185, 2004.
- GUPTA, J. N. D.; TUNC, E. A. Scheduling a two-stage hybrid flowshop with separable setup and removal times. **European Journal of Operational Research**, v. 77, n. 3, p. 415–428, 1994.
- GUPTA, J. N. D.; WERNER, F.; WULKENHAAR, G. Two-machine open shop scheduling with secondary criteria. **International Transactions in Operational Research**, v. 10, n. 3, p. 267–294, 2003.
- GUPTA, J. N.; DUDEK, R. A. Optimality criteria for flowshop schedules. **AIIE Transactions**, v. 3, n. 3, p. 199–205, 1971.
- GUPTA, J. Optimal flowshop schedules with no intermediate storage space. **Naval Research Logistics Quarterly**, p. 235–243, 1976.

- GUTIÉRREZ, C.; GARCÍA-MAGARIÑO, I. Modular design of a hybrid genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem. **Knowledge-Based Systems**, v. 24, n. 1, p. 102–112, 2011.
- GUTIN, G. Independent Sets and Cliques. In: GROS, J. L.; YELLEN, J. (Eds.). **Handbook of Graph Theory**. Boca Raton: CRC Press, 2003. p. 389–403.
- GUYON, O.; LEMAIRE, P.; PINSON, É.; RIVREAU, D. Solving an integrated job-shop problem with human resource constraints. **Annals of Operations Research**, v. 213, n. 1, p. 147–171, 2014.
- HAQ, A. N.; RAVINDRAN, D.; ARUNA, V.; NITHIYA, S. A hybridisation of metaheuristics for flow shop scheduling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 24, n. 5–6, p. 376–380, 2004.
- HARIRI, A. M. A.; POTTS, C. N. A branch and bound algorithm to minimize the number of late jobs in a permutation flow-shop. **European Journal of Operational Research**, v. 38, n. 2, p. 228–237, 1989.
- HARIRI, A. M. A.; POTTS, C. N. Algorithms for two-machine flow-shop sequencing with precedence constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 17, n. 2, p. 238–248, 1984.
- HE, Z.; YANG, T.; TIGER, A. An exchange heuristic imbedded with simulated annealing for due-dates job-shop scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 91, n. 1, p. 99–117, 1996.
- HEGDE, G.G.; KALATHUR, S.; TADIKAMALLA, P.R.; MAURER, J.; ABRAHAM, K.P. Production Scheduling on Parallel Machines: A Case Study. **Omega**, v. 26, n. 1, p. 63–73, 1998.
- HEINONEN, J.; PETTERSSON, F. Hybrid ant colony optimization and visibility studies applied to a job-shop scheduling problem. **Applied Mathematics and Computation**, v. 187, n. 2, p. 989–998, 2007.
- HERRMANN, J. W.; LEE, C.-Y.; HINCHMAN, J. I. M. Global Job Shop Scheduling With a Genetic Algorithm. **Production and Operations Management**, v. 4, n. 1, p. 30–45, 1995.
- HIGGINS, J. P. T.; GREEN, S. **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions**. New York: Wiley, 2005.
- HO, J. C.; CHANG, Y.-L. A new heuristic for the n-job, M-machine flow-shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 52, n. 2, p. 194–202, 1991.
- HO, N. B.; TAY, J. C.; LAI, E. M.-K. An effective architecture for learning and evolving flexible job-shop schedules. **European Journal of Operational Research**, v. 179, n. 2, p. 316–333, 2007.
- HOLLOWAY, C. A.; NELSON, R. T. Job Shop Scheduling with Due Dates and Variable Processing Times. **Management Science**, v. 20, n. 9, p. 1264–1275, 1974a.

HOLLOWAY, C. A.; NELSON, R. T. Job Shop Scheduling with Due Dates and Overtime Capability. **Management Science**, v. 21, n. 1, p. 68–78, 1974b.

HOLLOWAY, C. A.; NELSON, R. T. Job Shop Scheduling with Due Dates and Operation Overlap Feasibility. **IIE Transactions**, v. 7, n. 1, p. 16–20, 1975.

HOLTHAUS, O. Scheduling in job shops with machine breakdowns: an experimental study. **Computers & Industrial Engineering**, v. 36, n. 1, p. 137–162, 1999.

HONG, T.-P.; WANG, T.-T. Fuzzy flexible flow shops at two machine centers for continuous fuzzy domains. **Information Sciences**, v. 129, n. 1, p. 227–237, 2000.

HORN, W.A. Some simple scheduling algorithms. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 21, n.m., p. 177–185, 1974.

HORNG, S.-C.; LIN, S.-S.; YANG, F.-Y. Evolutionary algorithm for stochastic job shop scheduling with random processing time. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 3, p. 3603–3610, 2012.

HORNG, S.-C.; LIN, S.-Y. Multi-stage ordinal optimization based approach for job shop scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 219, n. 3, p. 1125–1134, 2012.

HOU, S.; HOOGEVEEN, H. The three-machine proportionate flow shop problem with unequal machine speeds. **Operations Research Letters**, v. 31, n. 3, p. 225–231, 2003.

HUANG, K.-L.; LIAO, C.-J. Ant colony optimization combined with taboo search for the job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 4, p. 1030–1046, 2008.

HUANG, R.-H. Multi-objective job-shop scheduling with lot-splitting production. **International Journal of Production Economics**, v. 124, n. 1, p. 206–213, 2010.

HUANG, R.-H.; YANG, C.-L. Ant colony system for job shop scheduling with time windows. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 1, p. 151–157, 2008.

HUANG, R.-H.; YANG, C.-L.; CHENG, W.-C. Flexible job shop scheduling with due window—a two-pheromone ant colony approach. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 2, p. 685–697, 2013.

HUANG, Y.-M.; LIN, J.-C. A new bee colony optimization algorithm with idle-time-based filtering scheme for open shop-scheduling problems. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 5, p. 5438–5447, 2011.

HUNSUCKER, J. L.; SHAH, J. R. Performance of priority rules in a due date flow shop. **Omega**, v. 20, n. 1, p. 73–89, 1992.

HUQ, F.; CUTRIGHT, K.; MARTIN, C. Employee scheduling and makespan minimization in a flow shop with multi-processor work stations: a case study. **Omega**, v. 32, n. 2, p. 121–129, 2004.

- HURINK, J.; KNUST, S. Tabu search algorithms for job-shop problems with a single transport robot. **European Journal of Operational Research**, v. 162, n. 1, p. 99–111, 2005.
- IGNALL, E.; SCHRAGE, L. Application of the Branch and Bound Technique to Some Flow-Shop Scheduling Problems. **Operations Research**, v. 13, n. 3, p. 400–412, 1965.
- ISHIBUCHI, H.; MISAKI, S.; TANAKA, H. Modified simulated annealing algorithms for the flow shop sequencing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 81, n. 2, p. 388–398, 1995.
- JACKSON, J.R. An extension of Johnson's result on job lot scheduling. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 3, n.m., p. 201–203, 1956.
- JANSEN, K.; MASTROLILLI, M.; SOLIS-OBA, R. Approximation schemes for job shop scheduling problems with controllable processing times. **European Journal of Operational Research**, v. 167, n. 2, p. 297–319, 2005.
- JAVADIAN, N.; FATTAHI, P.; FARAHMAND-MEHR, M.; AMIRI-AREF, M.; KAZEMI, M. An immune algorithm for hybrid flow shop scheduling problem with time lags and sequence-dependent setup times. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 63, p. 337–348, 2012.
- JENSEN, J. B.; PHILIPOOM, P. R.; MALHOTRA, M. K. Evaluation of scheduling rules with commensurate customer priorities in job shops. **Journal of Operations Management**, v. 13, n. 3, p. 213–228, 1995.
- JEONG, B.; KIM, Y.-D. Minimizing total tardiness in a two-machine re-entrant flowshop with sequence-dependent setup times. **Computers & Operations Research**, v. 47, p. 72–80, 2014.
- JIA, C. Minimizing variation in stochastic flow shop. **Operations Research Letters**, v. 23, n. 3, p. 109–111, 1998.
- JIA, H. Z.; FUH, J. Y. H.; NEE, A. Y. C.; ZHANG, Y. F. Integration of genetic algorithm and Gantt chart for job shop scheduling in distributed manufacturing systems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, n. 2, p. 313–320, 2007.
- JIA, S.; HU, Z.-H. Path-relinking Tabu search for the multi-objective flexible job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 47, p. 11–26, 2014.
- JIA, W.; JIANG, Z.; LI, Y. Scheduling to minimize the makespan in large-piece one-of-a-kind production with machine availability constraints. **Expert Systems With Applications**, v. 42, p. 9174–9182.
- JIN, F.; SONG, S.; WU, C. An improved version of the NEH algorithm and its application to large-scale flow-shop scheduling problems. **IIE Transactions**, v. 39, n. December 2014, p. 229–234, 2007.
- JIN, Z.; YANG, Z.; ITO, T. Metaheuristic algorithms for the multistage hybrid flowshop scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 100, n. 2, p. 322–334, 2006.

JOHNSON, S. M. Optimal two- and three-stage production schedules with setup times included. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 1, n. 1, p. 61–68, 1954.

KALCZYNSKI, P. J.; KAMBUROWSKI, J. A heuristic for minimizing the makespan in no-idle permutation flow shops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 49, n. 1, p. 146–154, 2005.

KALCZYNSKI, P. J.; KAMBUROWSKI, J. A heuristic for minimizing the expected makespan in two-machine flow shops with consistent coefficients of variation. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 3, p. 742–750, 2006.

KALCZYNSKI, P. J.; KAMBUROWSKI, J. On no-wait and no-idle flow shops with makespan criterion. **European Journal of Operational Research**, v. 178, n. 3, p. 677–685, 2007b.

KALCZYNSKI, P. J.; KAMBUROWSKI, J. On the NEH heuristic for minimizing the makespan in permutation flow shops. **Omega**, v. 35, n. 1, p. 53–60, 2007a.

KAMMER, M.; VAN DEN AKKER, M.; HOOGEVEEN, H. Identifying and exploiting commonalities for the job-shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 11, p. 1556–1561, 2011.

KANET, J. J. Load-limited order release in job shop scheduling systems. **Journal of Operations Management**, v. 7, n. 3, p. 44–58, 1988.

KANET, J. J.; HAYYA, J. C. Priority dispatching with operation due dates in a job shop. **Journal of Operations Management**, v. 2, n. 3, p. 167–175, 1982.

KANET, J. J.; ZHOU, Z. A Decision Theory Approach To Priority Dispatching for Job Shop Scheduling *. **Production and Operations Management**, v. 2, n. 1, p. 2–14, 1993.

KAPLANOĞLU, V. An object-oriented approach for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. **Expert Systems with Applications**, v. 45, p. 71–84, 2015.

KARABATI, S.; KOUVELIS, P. The permutation flow shop problem with sum of completion times performance criterion. **Naval Research Logistics**, v. 40, p. 843–862, 1993.

KARIMI, H.; RAHMATI, S. H. A.; ZANDIEH, M. An efficient knowledge-based algorithm for the flexible job shop scheduling problem. **Knowledge-Based Systems**, v. 36, p. 236–244, 2012.

KARIMI, N.; DAVOUDPOUR, H. A high performing metaheuristic for multi-objective flowshop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 52, p. 149–156, 2014.

KELLERER, H.; TAUTENHAHN, T.; WOEGINGER, G. Note: Open-shop scheduling with release dates to minimize maximum lateness. **Naval Research Logistics**, v. 42, n. 1, p. 141–145, 1995.

KHORMALI, A.; MIRZAZADEH, A.; FAEZ, F. The openshop batch processing problem with non-identical processing times, using simulated annealing and genetic

algorithms approaches. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 59, n. 9–12, p. 1157–1165, 2012.

KIM, J.-S.; KANG, S.-H.; LEE, S. M. Transfer batch scheduling for a two-stage flowshop with identical parallel machines at each stage. **Omega**, v. 25, n. 5, p. 547–555, 1997.

KIM, S.; BOBROWSKJ, P. M. Evaluating Order Release Mechanisms in a Job Shop With Sequence-Dependent Setup Times *. **Production and Operations Management**, v. 4, n. 2, p. 163–180, 1995.

KIM, Y.-D. Minimizing total tardiness in permutation flowshops. **European Journal of Operational Research**, v. 85, n. 3, p. 541–555, 1995.

KIS, T. Job-shop scheduling with processing alternatives. **European Journal of Operational Research**, v. 151, n. 2, p. 307–332, 2003.

KIS, T.; DE WERRA, D.; KUBIAK, W. A projective algorithm for preemptive open shop scheduling with two multiprocessor groups. **Operations Research Letters**, v. 38, n. 2, p. 129–132, 2010.

KOULAMAS, C. The Total Tardiness Problem: Review and Extensions. **Operations Research**, v. 42, n. 6, p. 1025–1041, 1994.

KOULAMAS, C.; KYPARISIS, G. J. Asymptotically optimal linear time algorithms for two-stage and three-stage flexible flow shops. **Naval Research Logistics**, v. 47, n. 3, p. 259–268, 2000.

KOULAMAS, C.; KYPARISIS, G. J. Open shop scheduling to minimize the number of late jobs. **Naval Research Logistics**, v. 45, n. 5, p. 525–532, 1998.

KOULAMAS, C.; KYPARISIS, G. J. The three-machine proportionate open shop and mixed shop minimum makespan problems. **European Journal of Operational Research**, v. 243, n. 1, p. 70–74, 2015.

KRAVCHENKO, S. A. A polynomial algorithm for a two-machine no-wait job-shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 106, n. 1, p. 101–107, 1998.

KUBIAK, W. A pseudo-polynomial algorithm for a two-machine no-wait job-shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 43, n. 3, p. 267–270, 1989.

KUBIAK, W.; LOU, S. X. C.; WANG, Y. Mean Flow Time Minimization in Reentrant Job Shops with a Hub. **Operations Research**, v. 44, n. 5, p. 764–776, 1996.

KUBIAK, W.; TIMKOVSKY, V. Total completion time minimization in two-machine job shops with unit-time operations. **European Journal of Operational Research**, v. 94, n. 2, p. 310–320, 1996.

KUBZIN, M. A.; STRUSEVICH, V. A.; BREIT, J.; SCHMIDT, G. Polynomial-time approximation schemes for two-machine open shop scheduling with nonavailability constraints. **Naval Research Logistics**, v. 53, n. 1, p. 16–23, 2006.

KURODA, M.; WANG, Z. Fuzzy job shop scheduling. **International Journal of Production Economics**, v. 44, n. 1, p. 45–51, 1996.

KYPARISIS, G. J.; KOULAMAS, C. Open shop scheduling with makespan and total completion time criteria. **Computers & Operations Research**, v. 27, n. 1, p. 15–27, 2000.

LAARHOVEN, P. J. M. V. A. N.; AARTS, E. H. L.; LENSTRA, J. K. Job Shop Scheduling by Simulated Annealing. **Operations Research**, v. 40, n. 1, p. 113–125, 1992.

LAGEWEG, B. J.; LENSTRA, J. K.; KAN, A. H. G. R. Job-Shop Scheduling By Implicit Enumeration. **Management Science**, v. 24, n. 4, p. 441–450, 1977.

LAHA, D.; SAPKAL, S. U. An improved heuristic to minimize total flow time for scheduling in the m-machine no-wait flow shop. **Computers & Industrial Engineering**, v. 67, p. 36–43, 2014.

LANN, A.; MOSHEIOV, G.; RINOTT, Y. Asymptotic optimality in probability of a heuristic schedule for open shops with job overlaps. **Operations Research Letters**, v. 22, n. 2–3, p. 63–68, 1998.

LAWLER, E. L.; LUBY, M. G.; VAZIRANI, V. V. Scheduling open shops with parallel machines. **Operations Research Letters**, v. 1, n. 4, p. 161–164, 1982.

LEE, C.-Y.; CHENG, T. C. E.; LIN, B. M. T. Minimizing the makespan in the 3-machine assembly-type flowshop scheduling problem. **Management Science**, v. 39, n. 5, p. 616–625, 1993.

LEE, G.-C. Real-time order flowtime estimation methods for two-stage hybrid flowshops. **Omega**, v. 42, n. 1, p. 1–8, 2014.

LEE, H. C.; DAGLI, C. H. A parallel genetic-neuro scheduler for job-shop scheduling problems. **International Journal of Production Economics**, v. 51, n. 1, p. 115–122, 1997.

LEE, T.; POSNER, M. E. Performance Measures and Schedules in Periodic Job Shops. **Operations Research**, v. 45, n. 1, p. 72–91, 1997.

LEE, W.-C.; CHEN, S.-K.; CHEN, C.-W.; WU, C.-C. A two-machine flowshop problem with two agents. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 1, p. 98–104, 2011.

LEE, W.-C.; SHIAU, Y.-R.; CHEN, S.-K.; WU, C.-C. A two-machine flowshop scheduling problem with deteriorating jobs and blocking. **International Journal of Production Economics**, v. 124, n. 1, p. 188–197, 2010.

LEI, D. Minimizing makespan for scheduling stochastic job shop with random breakdown. **Applied Mathematics and Computation**, v. 218, n. 24, p. 11851–11858, 2012.

LEI, D. Two-phase neighborhood search algorithm for two-agent hybrid flow shop scheduling problem. **Applied Soft Computing**, v. 34, p. 721–727, 2015b.

LEI, D. Variable neighborhood search for two-agent flow shop scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 80, p. 125–131, 2015a.

LEI, D.; GUO, X. An effective neighborhood search for scheduling in dual-resource constrained interval job shop with environmental objective. **International Journal of Production Economics**, v. 159, p. 296–303, 2015.

LENGYEL, A.; HATONO, I.; UEDA, K. Scheduling for on-time completion in job shops using feasibility function. **Computers & Industrial Engineering**, v. 45, n. 1, p. 215–229, 2003.

LEUNG, J Y-T. **Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2004.

LEVNER, E.; KATS, V.; LEVIT, V. E. An improved algorithm for cyclic flowshop scheduling in a robotic cell. **European Journal of Operational Research**, v. 97, n. 3, p. 500–508, 1997.

LEVY, Y.; ELLIS, T.J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science Journal**, v. 9, n.m., p. 181–212, 2006.

LI, D.-C.; HSU, P.-H.; WU, C.-C.; CHENG, T. C. E. Two-machine flowshop scheduling with truncated learning to minimize the total completion time. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 3, p. 655–662, 2011.

LI, J.; PAN, Q. Chemical-reaction optimization for solving fuzzy job-shop scheduling problem with flexible maintenance activities. **International Journal of Production Economics**, v. 145, n. 1, p. 4–17, 2013.

LI, J.; PAN, Q.; LIANG, Y.-C. An effective hybrid tabu search algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problems. **Computers & Industrial Engineering**, v. 59, n. 4, p. 647–662, 2010.

LI, J.; PAN, Q.; XIE, S. An effective shuffled frog-leaping algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 218, n. 18, p. 9353–9371, 2012.

LI, J.-Q.; PAN, Q.-K.; TASGETIREN, M. F. A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, n. 3, p. 1111–1132, 2014.

LI, K.; YANG, S-L. Non-identical parallel-machine scheduling research with minimizing total weighted completion times: Models, relaxations and algorithms. **Applied Mathematical Modelling**, v. 33, n. 4, p. 2145–2158, 2009.

LIAN, Z.; JIAO, B.; GU, X. A similar particle swarm optimization algorithm for job-shop scheduling to minimize makespan. **Applied Mathematics and Computation**, v. 183, n. 2, p. 1008–1017, 2006.

LIANG, J. J.; PAN, Q.-K.; TIEJUN, C.; WANG, L. Solving the blocking flow shop scheduling problem by a dynamic multi-swarm particle swarm optimizer.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 55, n. 5–8, p. 755–762, 2010.

LIAO, C.-J.; TJANDRADJAJA, E.; CHUNG, T.-P. An approach using particle swarm optimization and bottleneck heuristic to solve hybrid flow shop scheduling problem. **Applied Soft Computing**, v. 12, n. 6, p. 1755–1764, 2012.

LIAO, L.-M.; HUANG, C.-J. Tabu search for non-permutation flowshop scheduling problem with minimizing total tardiness. **Applied Mathematics and Computation**, v. 217, n. 2, p. 557–567, 2010.

LIAW, C.-F. A fast heuristic to minimize number of tardy jobs in preemptive open shops. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 31, n. 1, p. 27–35, 2014.

LIAW, C.-F. A hybrid genetic algorithm for the open shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 124, n. 1, p. 28–42, 2000.

LIAW, C.-F. A tabu search algorithm for the open shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 26, n. 2, p. 109–126, 1999.

LIAW, C.-F. An efficient simple metaheuristic for minimizing the makespan in two-machine no-wait job shops. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 10, p. 3276–3283, 2008.

LIAW, C.-F. An improved branch-and-bound algorithm for the preemptive open shop total completion time scheduling problem. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 30, n. 5, p. 327–335, 2013.

LIAW, C.-F. An iterative improvement approach for the nonpreemptive open shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 111, n. 3, p. 509–517, 1998.

LIAW, C.-F. Scheduling preemptive open shops to minimize total tardiness. **European Journal of Operational Research**, v. 162, n. 1, p. 173–183, 2005.

LIAW, C.-F. Scheduling two-machine preemptive open shops to minimize total completion time. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 8, p. 1349–1363, 2004.

LIAW, C.-F.; CHENG, C.-Y.; CHEN, M. Scheduling two-machine no-wait open shops to minimize makespan. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 4, p. 901–917, 2005.

LIAW, C.-F.; CHENG, C.-Y.; CHEN, M. The total completion time open shop scheduling problem with a given sequence of jobs on one machine. **Computers & Operations Research**, v. 29, n. 9, p. 1251–1266, 2002.

LIM, C. J.; MCMAHON, G. B. The three-machine flow-shop problem with arbitrary precedence relations. **European Journal of Operational Research**, v. 78, n. 2, p. 216–223, 1994.

- LIN, B. M. T.; CHENG, T. C. E. Scheduling with Centralized and Decentralized Batching Policies in Concurrent Open Shops. **Naval Research Logistics**, v. 58, p. 17–27, 2011.
- LIN, B. M. T.; LIN, Y.-Y.; FANG, K.-T. Two-machine flow shop scheduling of polyurethane foam production. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 286–294, 2013.
- LIN, C.-H.; LIAO, C.-J. Makespan minimization subject to flowtime optimality on identical parallel machines. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 10, p. 1655–1666, 2004.
- LIN, H.-T.; LEE, H.-T.; PAN, W.-J. Heuristics for scheduling in a no-wait open shop with movable dedicated machines. **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 2, p. 368–377, 2008.
- LIN, J. A hybrid biogeography-based optimization for the fuzzy flexible job-shop scheduling problem. **Knowledge-Based Systems**, v. 78, p. 59–74, 2015.
- LIN, Q.; GAO, L.; LI, X.; ZHANG, C. A hybrid backtracking search algorithm for permutation flow-shop scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 85, p. 437–446, 2015.
- LIN, S.-W.; YING, K.-C. Minimizing makespan in a blocking flowshop using a revised artificial immune system algorithm. **Omega**, v. 41, n. 2, p. 383–389, 2013.
- LIN, S.-Y.; GOODMAN, E.D.; PUNCH III, W.F. Investigating Parallel Genetic Algorithms on Job Shop Scheduling Problems. In: 6TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVOLUTIONARY PROGRAMMING, 1997, Indianapolis. **Proceedings**. Springer, 1997. p. 383–393.
- LIU, C.-D.; HSIEH, Y.-C. A hybrid algorithm for the multi-stage flow shop group scheduling with sequence-dependent setup and transportation times. **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 258–267, 2015.
- LITCHFIELD, J.; NARASIMHAN, R. Improving job shop performance through process queue management under transfer batching. **Production and Operations Management**, v. 9, n. 4, p. 336–348, 2000.
- LIU, B.; WANG, L.; JIN, Y.-H. An effective hybrid particle swarm optimization for no-wait flow shop scheduling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 31, n. 9–10, p. 1001–1011, 2006.
- LIU, C. .; BULFIN, R. . On the complexity of preemptive open-shop scheduling problems. **Operations Research Letters**, v. 4, n. 2, p. 71–74, 1985.
- LIU, C. Y.; BULFIN, R. L. Scheduling ordered open shops. **Computers & Operations Research**, v. 14, n. 3, p. 257–264, 1987.
- LIU, G.; SONG, S.; WU, C. Some heuristics for no-wait flowshops with total tardiness criterion. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 2, p. 521–525, 2013.

- LIU, M.; SUN, Z.; YAN, J.; KANG, J. An adaptive annealing genetic algorithm for the job-shop planning and scheduling problem. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 8, p. 9248–9255, 2011.
- LIU, P.; LU, X. A best possible on-line algorithm for two-machine flow shop scheduling to minimize makespan. **Computers & Operations Research**, v. 51, p. 251–256, 2014.
- LIU, S. Q.; KOZAN, E. Scheduling trains as a blocking parallel-machine job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 10, p. 2840–2852, 2009.
- LIU, T.-K.; TSAI, J.-T.; CHOU, J.-H. Improved genetic algorithm for the job-shop scheduling problem. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 9–10, p. 1021–1029, 2006.
- LOBO, B. J.; HODGSON, T. J.; KING, R. E.; THONEY, K. A.; WILSON, J. R. Allocating job-shop manpower to minimize Lmax: Optimality criteria, search heuristics, and probabilistic quality metrics. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 10, p. 2569–2584, 2013.
- LOURENÇO, H. R. Job-shop scheduling: Computational study of local search and large-step optimization methods. **European Journal of Operational Research**, v. 83, n. 2, p. 347–364, 1995.
- LOW, C. Job shop scheduling heuristics for sequence dependent setups. **Computers & Industrial Engineering**, v. 29, n. 1–4, p. 279–283, 1995.
- LOW, C. Simulated annealing heuristic for flow shop scheduling problems with unrelated parallel machines. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 8, p. 2013–2025, 2005.
- LOW, C.; WU, T. H.; HSU, C. M. Mathematical modelling of multi-objective job shop scheduling with dependent setups and re-entrant operations. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 27, n. 1–2, p. 181–189, 2005.
- LUH, G.-C.; CHUEH, C.-H. A multi-modal immune algorithm for the job-shop scheduling problem. **Information Sciences**, v. 179, n. 10, p. 1516–1532, 2009.
- LUH, P. B.; GOU, L.; ZHANG, Y. H.; et al. Job shop scheduling with group-dependent setups, finite buffers, and long time horizon. **Annals of Operations Research**, v. 76, p. 233–259, 1998.
- LUSHCHAKOVA, I.N. Preemptive scheduling of two uniform parallel machines to minimize total tardiness. **European Journal of Operational Research**, v. 219, n. 1, p. 27–33, 2012.
- MACCARTHY, B.L.; LIU, J.Y. Addressing the gap in scheduling research: a review of optimization and heuristic methods in production scheduling. **International Journal of Production Research**, v. 31, n. 1, p. 59–79, 1993.

- MANIKAS, A.; CHANG, Y.-L. Multi-criteria sequence-dependent job shop scheduling using genetic algorithms. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 1, p. 179–185, 2009.
- MAO, K.; PAN, Q.; PANG, X.; CHAI, T. A novel Lagrangian relaxation approach for a hybrid flowshop scheduling problem in the steelmaking-continuous casting process. **European Journal of Operational Research**, v. 236, n. 1, p. 51–60, 2014.
- MASCIS, A.; PACCIARELLI, D. Job-shop scheduling with blocking and no-wait constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 143, n. 3, p. 498–517, 2002.
- MASTROLILLI, M.; QUEYRANNE, M.; SCHULZ, A. S.; SVENSSON, O.; UHAN, N. A. Minimizing the sum of weighted completion times in a concurrent open shop. **Operations Research Letters**, v. 38, n. 5, p. 390–395, 2010.
- MATI, Y.; DAUZÈRE-PÉRÈS, S.; LAHLOU, C. A general approach for optimizing regular criteria in the job-shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 212, n. 1, p. 33–42, 2011.
- MATI, Y.; XIE, X.L. The complexity of the two-job shop scheduling problems with multi-purpose unrelated machines. **European Journal of Operational Research**, v. 152, n.m., p. 159–169, 2004.
- MATSUO, H. Cyclic sequencing problems in the two-machine permutation flow shop. Complexity, worst-case, and average-case analysis. **Naval Research Logistics**, v. 37, n. 5, p. 679–694, 1990.
- MATTA, M. E. A genetic algorithm for the proportionate multiprocessor open shop. **Computers & Operations Research**, v. 36, n. 9, p. 2601–2618, 2009.
- MATTFELD, D. C.; BIERWIRTH, C. An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives. **European Journal of Operational Research**, v. 155, n. 3, p. 616–630, 2004.
- MCMAHON, G. B.; BURTON, P. G. Flow-Shop Scheduling with the Branch-and-Bound Method. **Operations Research**, v. 15, n. 3, p. 473–481, 1967.
- MCNAUGHTON, R. Scheduling with deadlines and loss functions. **Management Science**, v. 6, n. 1, p. 1–12, 1959.
- MEHTA, P.; PANDIT, P.; PHILIP, D.; SHARMA, P. An efficient local search for minimizing completion time variance in permutation flow shops. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 5, p. 1000–1009, 2012.
- MELLOR, P. A Review of Job Shop Scheduling. **Operational Research Quarterly**, v. 17, n.m., p. 161–171, 1966.
- MELNYK, S. A.; DENZLER, D. R.; MAGNAN, G. L.; FREDENDALL, L. An Experimental Model for Investigating the Sensitivity of Job Shop Performance To Job Release Time Distribution Parameters. **Production and Operations Management**, v. 3, n. 1, p. 64–74, 1994.

- MELONI, C.; PACCIARELLI, D.; PRANZO, M. A rollout metaheuristic for job shop scheduling problems. **Annals of Operations Research**, v. 131, n. 1–4, p. 215–235, 2004.
- MENCÍA, C.; SIERRA, M. R.; VARELA, R. Depth-first heuristic search for the job shop scheduling problem. **Annals of Operations Research**, v. 206, n. 1, p. 265–296, 2013.
- MICHIE, S.; WILLIAMS, S. Reducing work related psychological ill health and sickness absence: a systematic literature review. **Occupational and Environmental Medicine**, v. 60, n.m., p. 3-9, 2003.
- MOHTASHAMI, A. A novel dynamic genetic algorithm-based method for vehicle scheduling in cross docking systems with frequent unloading operation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 90, p. 221-240, 2015.
- MOKHTARI, H.; DADGAR, M. Scheduling optimization of a stochastic flexible job-shop system with time-varying machine failure rate. **Computers & Operations Research**, v. 61, p. 31–45, 2015.
- MORADY GOHAREH, M.; KARIMI, B.; KHADEMIAN, M. A simulation-optimization approach for open-shop scheduling problem with random process times. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 5–8, p. 821–831, 2014.
- MOSHEIOV, G.; ORON, D. Minimizing the number of tardy jobs on a proportionate flowshop with general position-dependent processing times. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 7, p. 1601–1604, 2012.
- MOSHEIOV, G.; SARIG, A. Minimum weighted number of tardy jobs on an m-machine flow-shop with a critical machine. **European Journal of Operational Research**, v. 201, n. 2, p. 404–408, 2010.
- MOSLEHI, G.; KHORASANIAN, D. A hybrid variable neighborhood search algorithm for solving the limited-buffer permutation flow shop scheduling problem with the makespan criterion. **Computers & Operations Research**, v. 52, p. 260–268, 2014.
- MOSLEHI, G.; KHORASANIAN, D. Optimizing blocking flow shop scheduling problem with total completion time criterion. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 7, p. 1874–1883, 2013.
- MOSLEHI, G.; MAHNAM, M. A Pareto approach to multi-objective flexible job-shop scheduling problem using particle swarm optimization and local search. **International Journal of Production Economics**, v. 129, n. 1, p. 14–22, 2011.
- MOURLI, O.; POCHET, Y. A branch-and-bound algorithm for the hybrid flowshop. **International Journal of Production Economics**, v. 64, n. 1, p. 113–125, 2000.
- MUROVEC, B. Job-shop local-search move evaluation without direct consideration of the criterion's value. **European Journal of Operational Research**, v. 241, n. 2, p. 320–329, 2015.

- MUROVEC, B.; ŠUHEL, P. A repairing technique for the local search of the job-shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 153, n. 1, p. 220–238, 2004.
- NADERI, B.; FATEMI GHOMI, S. M. T.; AMINNAYERI, M.; ZANDIEH, M. A contribution and new heuristics for open shop scheduling. **Computers and Operations Research**, v. 37, n. 1, p. 213–221, 2010.
- NADERI, B.; GOHARI, S.; YAZDANI, M. Hybrid flexible flowshop problems: Models and solution methods. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, n. 24, p. 5767–5780, 2014.
- NADERI, B.; RUIZ, R. A scatter search algorithm for the distributed permutation flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 239, n. 2, p. 323–334, 2014.
- NADERI, B.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; KHALILI, M. Electromagnetism-like mechanism and simulated annealing algorithms for flowshop scheduling problems minimizing the total weighted tardiness and makespan. **Knowledge-Based Systems**, v. 23, n. 2, p. 77–85, 2010.
- NADERI, B.; ZANDIEH, M. Modeling and scheduling no-wait open shop problems. **International Journal of Production Economics**, v. 158, p. 256–266, 2014.
- NADERI, B.; ZANDIEH, M.; YAZDANI, M. Polynomial time approximation algorithms for proportionate open-shop scheduling. **International Transactions in Operational Research**, v. 21, n. 6, p. 1031–1044, 2014.
- NAGANO, M. S.; DA SILVA, A. A.; NOGUEIRA LORENA, L. A. An evolutionary clustering search for the no-wait flow shop problem with sequence dependent setup times. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 8, p. 3628–3633, 2014.
- NAGAR, A.; HERAGU, S. S.; HADDOCK, J. A combined branch-and-bound and genetic algorithm based approach for a flowshop scheduling problem. **Annals of Operations Research**, v. 63, n. 3, p. 397–414, 1996.
- NAWAZ, M.; ENSCORE, E. E.; HAM, I. A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. **Omega**, v. 11, n. 1, p. 91–95, 1983.
- NAZARATHY, Y.; WEISS, G. A fluid approach to large volume job shop scheduling. **Journal of Scheduling**, v. 13, n. 5, p. 509–529, 2010.
- NELSON, R. T.; HOLLOWAY, C. A.; MEI-LUN WONG, R. Centralized scheduling and priority implementation heuristics for a dynamic job shop model. **IIE Transactions**, v. 9, n. 1, p. 95–102, 1977.
- NÉRON, E.; BAPTISTE, P.; GUPTA, J. N. . Solving hybrid flow shop problem using energetic reasoning and global operations. **Omega**, v. 29, n. 6, p. 501–511, 2001.
- NEUMANN, K.; SCHNEIDER, W. G. Heuristic algorithms for job-shop scheduling problems with stochastic precedence constraints. **Annals of Operations Research**, v. 92, p. 45–63, 1999.

- NG, C. T.; KOVALYOV, M. Y. An FPTAS for scheduling a two-machine flowshop with one unavailability interval. **Naval Research Logistics**, v. 51, n. 3, p. 307–315, 2004.
- NG, C. T.; WANG, J.-B.; CHENG, T. C. E.; LAM, S. S. Flowshop scheduling of deteriorating jobs on dominating machines. **Computers & Industrial Engineering**, v. 61, n. 3, p. 647–654, 2011.
- NG, C. T.; WANG, J.-B.; CHENG, T. C. E.; LIU, L. L. A branch-and-bound algorithm for solving a two-machine flow shop problem with deteriorating jobs. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 1, p. 83–90, 2010.
- NIE, L.; GAO, L.; LI, P.; SHAO, X. Reactive scheduling in a job shop where jobs arrive over time. **Computers & Industrial Engineering**, v. 66, n. 2, p. 389–405, 2013.
- NIU, Q.; JIAO, B.; GU, X. Particle swarm optimization combined with genetic operators for job shop scheduling problem with fuzzy processing time. **Applied Mathematics and Computation**, v. 205, n. 1, p. 148–158, 2008.
- NOORI-DARVISH, S.; MAHDAVI, I.; MAHDAVI-AMIRI, R. A bi-objective possibilistic programming model for open shop scheduling problems with sequence-dependent setup times, fuzzy processing times, and fuzzy due dates. **Applied Soft Computing**, v. 12, n. 4, p. 1399–1416, 2012.
- NOWICKI, E.; SMUTNICKI, C. A fast taboo search algorithm for the no-wait job shop problem. **Management Science**, v. 42, n. 6, p. 797–813, 1996.
- NOWICKI, E.; SMUTNICKI, C. A fast tabu search algorithm for the permutation flow-shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 91, n. 1, p. 160–175, 1996.
- NOWICKI, E.; SMUTNICKI, C. An advanced tabu search algorithm for the job shop problem. **Journal of Scheduling**, v. 8, n. 2, p. 145–159, 2005.
- NOWICKI, E.; ZDRZAŁKA, S. A two-machine flow shop scheduling problem with controllable job processing times. **European Journal of Operational Research**, v. 34, n. 2, p. 208–220, 1988.
- OĞUZ, C.; FIKRET ERCAN, M.; EDWIN CHENG, T. C.; FUNG, Y. F. Heuristic algorithms for multiprocessor task scheduling in a two-stage hybrid flow-shop. **European Journal of Operational Research**, v. 149, n. 2, p. 390–403, 2003.
- OHTA, H.; NAKATANI, T. A heuristic job-shop scheduling algorithm to minimize the total holding cost of completed and in-process products subject to no tardy jobs. **International Journal of Production Economics**, v. 101, n. 1, p. 19–29, 2006.
- OSMAN, I.; POTTS, C. Simulated annealing for permutation flow-shop scheduling. **Omega**, v. 17, n. 6, p. 551–557, 1989.
- OULAMARA, A.; REBAINE, D.; SERAIRI, M. Scheduling the two-machine open shop problem under resource constraints for setting the jobs. **Annals of Operations Research**, v. 211, n. 1, p. 333–356, 2013.

- ÖZGÜVEN, C.; ÖZBAKIR, L.; YAVUZ, Y. Mathematical models for job-shop scheduling problems with routing and process plan flexibility. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, n. 6, p. 1539–1548, 2010.
- ÖZGÜVEN, C.; YAVUZ, Y.; ÖZBAKIR, L. Mixed integer goal programming models for the flexible job-shop scheduling problems with separable and non-separable sequence dependent setup times. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 2, p. 846–858, 2012.
- PALACIOS, J. J.; GONZÁLEZ, M. A.; VELA, C. R.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, I.; PUENTE, J. Genetic tabu search for the fuzzy flexible job shop problem. **Computers & Operations Research**, v. 54, p. 74–89, 2015.
- PALACIOS, J. J.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, I.; VELA, C. R.; PUENTE, J. Swarm lexicographic goal programming for fuzzy open shop scheduling. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 26, n. 6, p. 1201–1215, 2015.
- PAN, J. C.-H.; CHEN, J.-S. Mixed binary integer programming formulations for the reentrant job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 32, n. 5, p. 1197–1212, 2005.
- PAN, Q. K.; WANG, L.; ZHAO, B. H. An improved iterated greedy algorithm for the no-wait flow shop scheduling problem with makespan criterion. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 38, n. 7–8, p. 778–786, 2008.
- PAN, Q.-K.; RUIZ, R. An effective iterated greedy algorithm for the mixed no-idle permutation flowshop scheduling problem. **Omega**, v. 44, p. 41–50, 2014.
- PANAHI, H.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. Solving a multi-objective open shop scheduling problem by a novel hybrid ant colony optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 3, p. 2817–2822, 2011.
- PANWALKAR, S. S. Job Shop Sequencing Problem on Two Machines With Time Lag Constraints. **Management Science**, v. 19, n. 9, p. 1063–1066, 1973.
- PANWALKAR, S. S.; KHAN, A. W. A Convex Property of an ordered Flow Shop Sequencing Problem *. **Naval Research Logistics**, v. 24, n. 1, p. 159–162, 1977.
- PANWALKAR, S. S.; KHAN, A. W. Improved Branch and Bound Procedure For $n \times m$ Flow Shop Problems. **Naval Research Logistics**, v. 22, n. 4, p. 787–790, 1975.
- PARDALOS, P.; SHYLO, O.; VAZACOPOULOS, A. Solving job shop scheduling problems utilizing the properties of backbone and “big valley”. **Computational Optimization & Applications**, v. 47, n. 1, p. 61–76, 2010.
- PARK, P. S.; BOBROWSKI, P. M. Job release and labor flexibility in a dual resource constrained job shop. **Journal of Operations Management**, v. 8, n. 3, p. 230–249, 1989.
- PARTHANADEE, P.; BUDDHAKULSOMSIRI, J. Simulation modeling and analysis for production scheduling using real-time dispatching rules: A case study in canned fruit industry. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 245–255, 2010.

- PATERNINA-ARBOLEDA, C. D.; MONTOYA-TORRES, J. R.; ACERO-DOMINGUEZ, M. J.; HERRERA-HERNANDEZ, M. C. Scheduling jobs on a k-stage flexible flow-shop. **Annals of Operations Research**, v. 164, n. 1, p. 29–40, 2008.
- PATHUMNAKUL, S.; EGBELU, P. J. An algorithm for minimizing weighted earliness penalty in assembly job shops. **International Journal of Production Economics**, v. 103, n. 1, p. 230–245, 2006.
- PENG, B.; LÜ, Z.; CHENG, T. C. E. A tabu search/path relinking algorithm to solve the job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 53, p. 154–164, 2015.
- PENN, M.; RAVIV, T. An algorithm for the maximum revenue jobshop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 193, n. 2, p. 437–450, 2009.
- PETROVIC, D.; DUENAS, A.; PETROVIC, S. Decision support tool for multi-objective job shop scheduling problems with linguistically quantified decision functions. **Decision Support Systems**, v. 43, n. 4, p. 1527–1538, 2007.
- PEZZELLA, F.; MERELLI, E. A tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 120, n. 2, p. 297–310, 2000.
- PEZZELLA, F.; MORGANTI, G.; CIASCHETTI, G. A genetic algorithm for the Flexible Job-shop Scheduling Problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 10, p. 3202–3212, 2008.
- PHILIPOOM, P. R.; MARKLAND, R. E.; FRY, T. D. Sequencing rules, progress milestones and product structure in a multistage job shop. **Journal of Operations Management**, v. 8, n. 3, p. 209–229, 1989.
- PINEDO, M. A note on the flow time and the number of tardy jobs in stochastic open shops. **European Journal of Operational Research**, v. 18, n. 1, p. 81–85, 1984.
- PINEDO, M. A note on the two machine job shop with exponential processing times. **Naval Research Logistics**, v. 28, n. 4, p. 693–696, 1981.
- PINEDO, M. L.; ROSS, S. M. Minimizing Expected Makespan in Stochastic Open Shops. **Advances in Applied Probability**, v. 14, n. 4, p. 898–911, 1982.
- PINEDO, M. L.; **Minimizing the Expected Makespan in Stochastic Flow Shops. Operations Research**, v. 30, n. 1, p. 148–162, 1982.
- PINEDO, M. **Scheduling: Theory, Algorithms and Systems**. 4. ed. New York: Springer, 2012.
- PINEDO, M.; SINGER, M. A Shifting Bottleneck Heuristic for Minimizing the Total Weighted Tardiness in a Job Shop. **Naval Research Logistics**, v. 46, p. 1–17, 1999.
- PORTMANN, M.-C.; VIGNIER, A.; DARDILHAC, D.; DEZALAY, D. Branch and bound crossed with GA to solve hybrid flowshops. **European Journal of Operational Research**, v. 107, n. 2, p. 389–400, 1998.

POTTS, C. N. An adaptive branching rule for the permutation flow-shop problem. **European Journal of Operational Research**, v. 5, n. 1, p. 19–25, 1980.

POTTS, C. N.; BAKER, K. R. Flow shop scheduling with lot streaming. **Operations Research Letters**, v. 8, n. 6, p. 297–303, 1989.

POTTS, C.N.; STRUSEVICH, V.A. Fifty years of scheduling: a survey of milestones. **Journal of the Operational Research Society**, v. 60, n.m., p. S41-S68, 2009.

PRINS, C. Competitive genetic algorithms for the open-shop problem. **Mathematical Methods of Operations Research**, v. 52, n. 3, p. 389–411, 2000.

QING-DAO-ER-JI, R.; WANG, Y.; WANG, X. Inventory based two-objective job shop scheduling model and its hybrid genetic algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 3, p. 1400–1406, 2013.

QIU, X.; LAU, H. Y. K. An AIS-based hybrid algorithm with PDRs for multi-objective dynamic online job shop scheduling problem. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 3, p. 1340–1351, 2013.

RAJENDRAN, C. Heuristic algorithm for scheduling in a flowshop to minimize total flowtime. **International Journal of Production Economics**, v. 29, n. 1, p. 65–73, 1993.

RAJENDRAN, C.; CHAUDHURI, D. An efficient heuristic approach to the scheduling of jobs in a flowshop. **European Journal of Operational Research**, v. 61, n. 3, p. 318–325, 1992.

RAJENDRAN, C.; CHAUDHURI, D. Heuristic algorithms for continuous flow-shop problem. **Naval Research Logistics**, v. 37, n. 5, p. 695–705, 1990.

RAJENDRAN, C.; ZIEGLER, H. A heuristic for scheduling to minimize the sum of weighted flowtime of jobs in a flowshop with sequence-dependent setup times of jobs. **Computers & Industrial Engineering**, v. 33, n. 1, p. 281–284, 1997.

RAJENDRAN, C.; ZIEGLER, H. Scheduling to minimize the sum of weighted flowtime and weighted tardiness of jobs in a flowshop with sequence-dependent setup times. **European Journal of Operational Research**, v. 149, n. 3, p. 513–522, 2003.

RAJENDRAN, C.; ZIEGLER, H. Two ant-colony algorithms for minimizing total flowtime in permutation flowshops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 48, n. 4, p. 789–797, 2005.

RAMALHINHO LOURENÇO, H. Sevast'yanov's algorithm for the flow-shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 91, n. 1, p. 176–189, 1996.

RAMAN, N. Minimum tardiness scheduling in flow shops: Construction and evaluation of alternative solution approaches. **Journal of Operations Management**, v. 12, n. 2, p. 131–151, 1995.

RAVINDRAN, D.; SELVAKUMAR, S. J.; SIVARAMAN, R.; HAQ, A. N. Flow shop scheduling with multiple objective of minimizing makespan and total flow time.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 25, n. 9–10, p. 1007–1012, 2005.

REN, H.; WENG, M. X. An efficient priority rule for scheduling job shops to minimize mean tardiness. **IIE Transactions**, v. 38, n. 9, p. 789–795, 2006.

REZA HEJAZI, S.; SAGHAFIAN S. Flowshop-scheduling problems with makespan criterion: a review. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 14, p. 2895–2929, 2005.

RIBAS, I.; COMPANYS, R. Efficient heuristic algorithms for the blocking flow shop scheduling problem with total flow time minimization. **Computers & Industrial Engineering**, v. 87, p. 30–39, 2015.

RIBAS, I.; COMPANYS, R.; TORT-MARTORELL, X. An efficient Discrete Artificial Bee Colony algorithm for the blocking flow shop problem with total flowtime minimization. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 15–16, p. 6155–6167, 2015.

RIBAS, I.; COMPANYS, R.; TORT-MARTORELL, X. An iterated greedy algorithm for the flowshop scheduling problem with blocking. **Omega**, v. 39, n. 3, p. 293–301, 2011.

RIFAI, A.P.; NGUYEN, H-T.; DAWAL, S.Z.M. Multi-objective adaptive large neighborhood search for distributed reentrant permutation flow shop scheduling. **Applied Soft Computing**, v. 40, n.m., p. 42–57, 2016.

RINNOOY KAN, A.H.G. **Machine Scheduling Problems**: Classification, complexity and computations. The Hague: Martinus Nijhoff, 1976.

RIOS-MERCADO, R. Z.; BARD, J. F. A branch-and-bound algorithm for permutation flow shops with sequence-dependent setup times. **IIE Transactions**, v. 31, n. June, p. 721–731, 1999.

ROJAS-SANTIAGO, M.; DAMODARAN, P.; MUTHUSWAMY, S.; VÉLEZ-GALLEGO, M. C. Makespan minimization in a job shop with a BPM using simulated annealing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9–12, p. 2383–2391, 2013.

RONCONI, D. P. A branch-and-bound algorithm to minimize the makespan in a flowshop with blocking. **Annals of Operations Research**, v. 138, n. 1, p. 53–65, 2005.

RONCONI, D. P.; HENRIQUES, L. R. S. Some heuristic algorithms for total tardiness minimization in a flowshop with blocking. **Omega**, v. 37, n. 2, p. 272–281, 2009.

ROSHANAEI, V.; SEYYED ESFEHANI, M. M.; ZANDIEH, M. Integrating non-preemptive open shops scheduling with sequence-dependent setup times using advanced metaheuristics. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 259–266, 2010.

- ROSSI, A. Flexible job shop scheduling with sequence-dependent setup and transportation times by ant colony with reinforced pheromone relationships. **International Journal of Production Economics**, v. 153, p. 253–267, 2014.
- SAADANI, N. E. H.; GUINET, A.; MOALLA, M. Three stage no-idle flow-shops. **Computers & Industrial Engineering**, v. 44, n. 3, p. 425–434, 2003.
- SABUNCUOGLU, I.; BAYIZ, M. Job shop scheduling with beam search. **European Journal of Operational Research**, v. 118, n. 2, p. 390–412, 1999.
- SABUNCUOGLU, I.; COMLEKCI, A. Operation-based flowtime estimation in a dynamic job shop. **Omega**, v. 30, n. 6, p. 423–442, 2002.
- SADEH, N.; FOX, M. S. Variable and value ordering heuristics for the job shop scheduling constraint satisfaction problem. **Artificial Intelligence**, v. 86, n. 1, p. 1–41, 1996.
- SADEH, N.; SYCARA, K.; XIONG, Y. Backtracking techniques for the job shop scheduling constraint satisfaction problem. **Artificial Intelligence**, v. 76, n. 1–2, p. 455–480, 1995.
- SAHNEY, V. K. Labor Assignment in Single Server, Two-Machine Flow Shop with Switching Times. **AIIE Transactions**, v. 3, n. 4, p. 264–270, 1971.
- SAMARGHANDI, H. A particle swarm optimisation for the no-wait flow shop problem with due date constraints. **International Journal of Production Research**, v. 53, n. 9, p. 2853–2870, 2015.
- SARIN, S.; LEFOKA, M. Scheduling heuristic for the n-jobm-machine flow shop. **Omega**, v. 21, n. 2, p. 229–234, 1993.
- SCHUSTER, C. J.; FRAMINAN, J. M. Approximative procedures for no-wait job shop scheduling. **Operations Research Letters**, v. 31, n. 4, p. 308–318, 2003.
- SCHUURMAN, P.; WOEGINGER, G. J. Approximation algorithms for the multiprocessor open shop scheduling problem. **Operations Research Letters**, v. 24, n. 4, p. 157–163, 1999.
- SCUDDER, G. D.; SMITH-DANIELS, D. E.; ROHLEDER, T. Use of the net present value criterion in a random job shop where early shipments are forbidden. **Journal of Operations Management**, v. 9, n. 4, p. 526–547, 1990.
- SCULLI, D. Priority dispatching rules in job shops with assembly operations and random delays. **Omega**, v. 8, n. 2, p. 227–234, 1980.
- SELS, V.; CRAEYMEERSCH, K.; VANHOUCKE, M. A hybrid single and dual population search procedure for the job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 215, n. 3, p. 512–523, 2011.
- SEN, T.; GUPTA, S.K. A State-of-Art Survey of Static Scheduling Research Involving Due Dates. **Omega**, v. 12, n. 1, p. 63–76, 1984.
- SHA, D. Y.; HSU, C.-Y. A hybrid particle swarm optimization for job shop scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 51, n. 4, p. 791–808, 2006.

SHA, D. Y.; HSU, C.-Y. A new particle swarm optimization for the open shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 10, p. 3243–3261, 2008.

SHA, D. Y.; LIN, H.-H. A multi-objective PSO for job-shop scheduling problems. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 2, p. 1065–1070, 2010.

SHABTAY, D.; ARVIV, K.; STERN, H.; EDAN, Y. A combined robot selection and scheduling problem for flow-shops with no-wait restrictions. **Omega**, v. 43, p. 96–107, 2014.

SHABTAY, D.; GASPER, N. Two-machine flow-shop scheduling with rejection. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 5, p. 1087–1096, 2012.

SHABTAY, D.; KASPI, M. Minimizing the Makespan in Open-Shop Scheduling Problems with a Convex Resource Consumption Function. **Naval Research Logistics**, v. 53, p. 204–216, 2006.

SHAKHLEVICH, N.; HOOGEVEEN, H. A N.; PINEDO, M. Minimizing total weighted completion time in a proportionate flow shop. **Journal of Scheduling**, v. 1, p. 157–168, 1998.

SHAMSHIRBAND, S.; SHOJAFAR, M.; HOSSEINABADI, A. A. R.; et al. OSGA: genetic-based open-shop scheduling with consideration of machine maintenance in small and medium enterprises. **Annals of Operations Research**, v. 229, n. 1, p. 743–758, 2015.

SHEN, L.; BUSCHER, U. Solving the serial batching problem in job shop manufacturing systems. **European Journal of Operational Research**, v. 221, n. 1, p. 14–26, 2012.

SHEN, X.-N.; YAO, X. Mathematical modeling and multi-objective evolutionary algorithms applied to dynamic flexible job shop scheduling problems. **Information Sciences**, v. 298, p. 198–224, 2015.

SHIAU, D.-F.; CHENG, S.-C.; HUANG, Y.-M. Proportionate flexible flow shop scheduling via a hybrid constructive genetic algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 34, n. 2, p. 1133–1143, 2008.

SIDNEY, J. B.; POTTS, C. N.; SRISKANDARAJAH, C. A heuristic for scheduling two-machine no-wait flow shops with anticipatory setups. **Operations Research Letters**, v. 26, n. 4, p. 165–225, 2000.

SIMONS, J. Heuristics in flow shop scheduling with sequence dependent setup times. **Omega**, v. 20, n. 2, p. 215–225, 1992.

SMITH, M. L.; PANWALKAR, S. S.; DUDEK, R. A. Flowshop Sequencing Problem with Ordered Processing Time Matrices. **Management Science**, v. 21, n. 5, p. 544–549, 1975.

SMITH, M. L.; PANWALKAR, S. S.; DUDEK, R. A. Flowshop Sequencing Problem with Ordered Processing Time Matrices: A general case. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 23, n. 3, p. 481–486, 1976.

SMITH, M. L.; SEIDMANN, A. Due date selection procedures for job-shop simulation. **Computers & Industrial Engineering**, v. 7, n. 3, p. 199–207, 1983.

SMITH, R. D.; DUDEK, R. A. A General Algorithm for solution of the n-Job, M-Machine Sequencing Problem of the Flow Shop. **Operations Research**, v. 15, n. 1, p. 71–82, 1967

SOEWANDI, H.; ELMAGHRABY, S. E. Sequencing three-stage flexible flowshops with identical machines to minimize makespan. **IIE Transactions**, v. 33, n. 11, p. 985–993, 2001.

SPANOS, A. C.; PONIS, S. T.; TATSIPOPOULOS, I. P.; CHRISTOU, I. T.; ROKOU, E. A new hybrid parallel genetic algorithm for the job-shop scheduling problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 21, n. 3, p. 479–499, 2014.

STEINHÖFEL, K.; ALBRECHT, A.; WONG, C. K. Fast parallel heuristics for the job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 29, n. 2, p. 151–169, 2002.

STRUSEVICH, V. A. A greedy open shop heuristic with job priorities. **Annals of Operations Research**, v. 83, n. 0, p. 253–270, 1998.

STRUSEVICH, V. A. Two machine open shop scheduling problem with setup, processing and removal times separated. **Computers & Operations Research**, v. 20, n. 6, p. 597–611, 1993.

SULIMAN, S. M. A. A two-phase heuristic approach to the permutation flow-shop scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 64, n. 1, p. 143–152, 2000.

SUNG LEE, D.; VASSILIADIS, V. S.; PARK, J. M. A novel threshold accepting meta-heuristic for the job-shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 13, p. 2199–2213, 2004.

SUNG, C. S.; KIM, Y. H. Minimizing makespan in a two-machine flowshop with dynamic arrivals allowed. **Computers & Operations Research**, v. 29, n. 3, p. 275–294, 2002.

SZWARC, W. A note on the flow-shop problem without interruptions in job processing. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 28, n. 4, p. 665–669, 1981a.

SZWARC, W. Extreme Solutions of the Two Machine Flow-Shop Problem. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 28, n. 1, p. 103–114, 1981b.

SZWARC, W. Solvable Cases of the Flow-Shop Problem Without Interruptions in Job Processing. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 30, n. 1, p. 179–183, 1983b.

SZWARC, W. Special Cases of the Flow-Shop Problem. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 24, n. 3, p. 483–492, 1977.

SZWARC, W. The Flow-Shop Problem with Mean Completion Time Criterion. **IIE Transactions**, v. 15, n. 2, p. 172–176, 1983a.

SZWARC, W.; GUPTA, J. N. D. Flow-Shop Problem With Sequence-Dependent Additive Setup Times. **Naval Research Logistics**, v. 34, n. 5, p. 619–627, 1987.

T'KINDT, V.; BILLAUT, J.-C.; PROUST, C. Solving a bicriteria scheduling problem on unrelated parallel machines occurring in the glass bottle industry. **European Journal of Operational Research**, v. 135, n. 1, p. 42–49, 2001.

T'KINDT, V.; MONMARCHÉ, N.; TERCINET, F.; LAÜGT, D. An Ant Colony Optimization algorithm to solve a 2-machine bicriteria flowshop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 142, n. 2, p. 250–257, 2002.

TAILLARD, E. Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 47, n. 1, p. 65–74, 1990.

TANG, L.; BAI, D. A new heuristic for open shop total completion time problem. **Applied Mathematical Modelling**, v. 34, n. 3, p. 735–743, 2010.

TARANTILIS, C. D.; KIRANOUDIS, C. T. A list-based threshold accepting method for job shop scheduling problems. **International Journal of Production Economics**, v. 77, n. 2, p. 159–171, 2002.

TAUTENHAHN, T. On Unit Time Open Shops with Additional Restrictions. **Mathematical Methods of Operations Research**, v. 43, p. 215–231, 1996.

TAUTENHAHN, T.; WOEGINGER, G. J. Minimizing the total completion time in a unit-time open shop with release times. **Operations Research Letters**, v. 20, n. 5, p. 207–212, 1997.

TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; DANESHMAND-MEHR, M. A computer simulation model for job shop scheduling problems minimizing makespan. **Computers & Industrial Engineering**, v. 48, n. 4, p. 811–823, 2005.

TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R.; JOLAI, F.; VAZIRI, F.; AHMED, P. K.; AZARON, A. A hybrid method for solving stochastic job shop scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 170, n. 1, p. 185–206, 2005.

TAVARES NETO, R.F.; GODINHO FILHO, M. Literature review regarding Ant Colony Optimization applied to scheduling problems: Guidelines for implementation and directions for future research. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 26, n. 1, p. 150–161, 2013.

THOMPSON, G. L. Recent Developments in the Job-Shop Scheduling Problem. **Naval Research Logistics**, v. 7, n. 4, p. 585–589, 1960.

TIMKOVSKY, V.G. Reducibility among Scheduling Classes. In: LEUNG, J. Y.-T. (Ed.). **Handbook of Scheduling: Algorithms, Models and Performance Analysis**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2004. p. 150–191.

TOPALOGLU, S.; KILINCLI, G. A modified shifting bottleneck heuristic for the reentrant job shop scheduling problem with makespan minimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, n. 7–8, p. 781–794, 2009.

- TRELEVEN, M. D.; ELVERS, D. A. An investigation of labor assignment rules in a dual-constrained job shop. **Journal of Operations Management**, v. 6, n. 1, p. 51–68, 1985.
- TSAI, J.-T.; HO, W.-H.; LIU, T.-K.; CHOU, J.-H. Improved immune algorithm for global numerical optimization and job-shop scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, v. 194, n. 2, p. 406–424, 2007.
- TSENG, F. T.; STAFFORD, E. F.; GUPTA, J. N. . An empirical analysis of integer programming formulations for the permutation flowshop. **Omega**, v. 32, n. 4, p. 285–293, 2004.
- TSUBONE, H.; OHBA, M.; TAKAMUKI, H.; MIYAKE, Y. A production scheduling system for a hybrid flow shop—a case study. **Omega**, v. 21, n. 2, p. 205–214, 1993.
- TURNER, S.; BOOTH, D. Comparison of heuristics for flow shop sequencing. **Omega**, v. 15, n. 1, p. 75–78, 1987.
- VAIRAKTARAKIS, G.; SAHNI, S. Dual Criteria Preemptive Open-Shop Problems with Minimum Makespan. **Naval Research Logistics**, v. 42, p. 103–121, 1995.
- VAN DEMAN, J. M.; BAKER, K. R. Minimizing mean flowtime in the flow shop with no intermediate queues. **AIIE Transactions**, v. 6, n. 1, p. 28–34, 1974.
- VAN DEN AKKER, M.; HOOGEVEEN, H.; WOEGINGER, G. J. The two-machine open shop problem: To fit or not to fit, that is the question. **Operations Research Letters**, v. 31, n. 3, p. 219–224, 2003.
- VEMPATI, V. S.; CHEN, C.-L.; BULLINGTON, S. F. An effective heuristic for flow shop problems with total flow time as criterion. **Computers & Industrial Engineering**, v. 25, n. 1, p. 219–222, 1993.
- VEPSALAINEN, A. P. J.; MORTON, T. E. Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs. **Management Science**, v. 33, n. 8, p. 1035–1047, 1987.
- VILCOT, G.; BILLAUT, J.-C. A tabu search and a genetic algorithm for solving a bicriteria general job shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 190, n. 2, p. 398–411, 2008.
- VINOD, V.; SRIDHARAN, R. Dynamic job-shop scheduling with sequence-dependent setup times: Simulation modeling and analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 36, n. 3–4, p. 355–372, 2008.
- VINOD, V.; SRIDHARAN, R. Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system. **International Journal of Production Economics**, v. 129, n. 1, p. 127–146, 2011.
- WAGNEUR, E.; SRISKANDARAJAH, C. Two-machine permutation flow shop with state-dependent processing times. **Naval Research Logistics**, v. 40, n. 5, p. 697–717, 1993.

- WANG, C.; SONG, S.; GUPTA, J. N. D.; WU, C. A three-phase algorithm for flowshop scheduling with blocking to minimize makespan. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 11, p. 2880–2887, 2012.
- WANG, J.-B.; WANG, M.-Z. Minimizing makespan in three-machine flow shops with deteriorating jobs. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 2, p. 547–557, 2013.
- WANG, K.; CHOI, S. H. A holonic approach to flexible flow shop scheduling under stochastic processing times. **Computers & Operations Research**, v. 43, p. 157–168, 2014.
- WANG, L.; ZHENG, D.-Z. An effective hybrid optimization strategy for job-shop scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 28, n. 6, p. 585–596, 2001.
- WANG, L.; ZHOU, G.; XU, Y.; WANG, S.; LIU, M. An effective artificial bee colony algorithm for the flexible job-shop scheduling problem. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1–4, p. 303–315, 2012.
- WANG, X.; CHENG, T. C. E. An approximation scheme for two-machine flowshop scheduling with setup times and an availability constraint. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 10, p. 2894–2901, 2007.
- WANG, X.; EDWIN CHENG, T. C. Heuristics for two-machine flowshop scheduling with setup times and an availability constraint. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 1, p. 152–162, 2007.
- WANG, Y. M.; YIN, H. L.; QIN, K. DA. A novel genetic algorithm for flexible job shop scheduling problems with machine disruptions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 5–8, p. 1317–1326, 2013.
- WANG, Y. M.; YIN, H. L.; WANG, J. Genetic algorithm with new encoding scheme for job shop scheduling. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, n. 9–10, p. 977–984, 2009.
- WANG, Z.; XING, W.; BAI, F. No-wait flexible flowshop scheduling with no-idle machines. **Operations Research Letters**, v. 33, n. 6, p. 609–614, 2005.
- WEIN, L. M.; CHEVALIER, P. B. A Broader View of the Job-Shop Scheduling Problem. **Management Science**, v. 38, n. 7, p. 1018–1033, 1992.
- WEIN, L. M.; OU, J. the Impact of Processing Time Knowledge on Dynamic Job-Shop Scheduling. **Management Science**, v. 37, n. 8, p. 1002–1014, 1991.
- WEMMERLÖV, U.; VAKHARIA, A. J. Job and Family Scheduling of a Flow-Line Manufacturing Cell: A Simulation Study. **IIE Transactions**, v. 23, n. 4, p. 383–393, 1991.
- WENQI, H.; AIHUA, Y. An improved shifting bottleneck procedure for the job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 31, n. 12, p. 2093–2110, 2004.

WILBRECHT, J. K.; PRESCOTT, W. B. The Influence of Setup Time on Job Shop Performance. **Management Science**, v. 16, n. 4, p. B274–B280, 1969.

WOEGINGER, G. J. Inapproximability results for no-wait job shop scheduling. **Operations Research Letters**, v. 32, n. 4, p. 320–325, 2004.

WONG, T. C.; CHAN, F. T. S.; CHAN, L. Y. A resource-constrained assembly job shop scheduling problem with Lot Streaming technique. **Computers and Industrial Engineering**, v. 57, n. 3, p. 983–995, 2009.

WOOLLAM, C. R. Flowshop with no idle machine time allowed. **Computers & Industrial Engineering**, v. 10, n. 1, p. 69–76, 1986.

WOOLLAM, C. R.; SAMBANDAM, N. The flow shop problem with a composite cost function. **Computers & Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, p. 83–89, 1985.

WU, S. D.; BYEON, E.-S.; STORER, R. H. A Graph-Theoretic Decomposition of the Job Shop Scheduling Problem To Achieve Scheduling Robustness. **Operations Research**, v. 47, n. 1, p. 113–124, 1999.

XING, L.-N.; CHEN, Y.-W.; WANG, P.; ZHAO, Q.-S.; XIONG, J. A Knowledge-Based Ant Colony Optimization for Flexible Job Shop Scheduling Problems. **Applied Soft Computing**, v. 10, n. 3, p. 888–896, 2010.

XING, L.-N.; CHEN, Y.-W.; YANG, K.-W. Multi-objective flexible job shop schedule: Design and evaluation by simulation modeling. **Applied Soft Computing**, v. 9, n. 1, p. 362–376, 2009.

XING, L.-N.; CHEN, Y.-W.; YANG, K.-W. Multi-population interactive coevolutionary algorithm for flexible job shop scheduling problems. **Computational Optimization and Applications**, v. 48, n. 1, p. 139–155, 2011.

XIONG, J.; XING, L.; CHEN, Y. Robust scheduling for multi-objective flexible job-shop problems with random machine breakdowns. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 112–126, 2013.

XU, J.; YIN, Y.; CHENG, T. C. E.; WU, C.-C.; GU, S. A memetic algorithm for the re-entrant permutation flowshop scheduling problem to minimize the makespan. **Applied Soft Computing**, v. 24, p. 277–283, 2014.

XU, Y.; WANG, L.; LIU, M.; WANG, S. Y. An effective shuffled frog-leaping algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 5–8, p. 1529–1537, 2013.

YANG, D.-L.; HSU, C.-J.; KUO, W.-H. A two-machine flowshop scheduling problem with a separated maintenance constraint. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 3, p. 876–883, 2008.

YANG, D.-L.; KUO, W.-H.; CHERN, M.-S. Multi-family scheduling in a two-machine reentrant flow shop with setups. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 1160–1170, 2008.

- YANG, J. Minimizing total completion time in a two-stage hybrid flow shop with dedicated machines at the first stage. **Computers & Operations Research**, v. 58, p. 1–8, 2015.
- YANG, S.; WANG, D. A new adaptive neural network and heuristics hybrid approach for job-shop scheduling. **Computers & Operations Research**, v. 28, n. 10, p. 955–971, 2001.
- YAZDANI, M.; AMIRI, M.; ZANDIEH, M. Flexible job-shop scheduling with parallel variable neighborhood search algorithm. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 1, p. 678–687, 2010.
- YEH, W-C.; CHUANG, M-C.; LEE, W-C. Uniform parallel machine scheduling with resource consumption constraint. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 8, p. 2131-2138, 2015.
- YEUNG, W. K.; OĞUZ, C.; EDWIN CHENG, T. C. Two-stage flowshop earliness and tardiness machine scheduling involving a common due window. **International Journal of Production Economics**, v. 90, n. 3, p. 421–434, 2004.
- YOKOYAMA, M. Hybrid flow-shop scheduling with assembly operations. **International Journal of Production Economics**, v. 73, n. 2, p. 103–116, 2001.
- YOSHITOMI, Y. A Genetic Algorithm Approach to Solving Stochastic Job-shop Scheduling Problems. **International Transactions in Operational Research**, v. 9, n. 4, p. 479–495, 2002.
- YOSHITOMI, Y.; YAMAGUCHI, R. A genetic algorithm and the Monte Carlo method for stochastic job-shop scheduling. **International Transactions in Operational Research**, v. 10, n. 6, p. 577–596, 2003.
- YUAN, J.; SOUKAL, A.; CHEN, Y.; LU, L. A note on the complexity of flow shop scheduling with transportation constraints. **European Journal of Operational Research**, v. 178, n. 3, p. 918-925, 2007.
- YUAN, Y.; XU, H. An integrated search heuristic for large-scale flexible job shop scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 12, p. 2864–2877, 2013a.
- YUAN, Y.; XU, H. Flexible job shop scheduling using hybrid differential evolution algorithms. **Computers & Industrial Engineering**, v. 65, n. 2, p. 246–260, 2013b.
- YUAN, Y.; XU, H.; YANG, J. A hybrid harmony search algorithm for the flexible job shop scheduling problem. **Applied Soft Computing**, v. 13, n. 7, p. 3259–3272, 2013.
- YUSOF, R.; KHALID, M.; HUI, G. T.; MD YUSOF, S.; OTHMAN, M. F. Solving job shop scheduling problem using a hybrid parallel micro genetic algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 11, n. 8, p. 5782–5792, 2011.
- ZANDIEH, M.; ADIBI, M. A. Dynamic job shop scheduling using variable neighbourhood search. **International Journal of Production Research**, v. 48, n. 8, p. 2449–2458, 2010.

ZEGORDI, S. H.; ITOH, K.; ENKAWA, T. Minimizing makespan for flow shop scheduling by combining simulated annealing with sequencing knowledge.

European Journal of Operational Research, v. 85, n. 3, p. 515–531, 1995.

ZENG, C.; TANG, J.; YAN, C. Scheduling of no buffer job shop cells with blocking constraints and automated guided vehicles. **Applied Soft Computing**, v. 24, p. 1033–1046, 2014.

ZHANG, C. Y.; LI, P.; RAO, Y.; GUAN, Z. A very fast TS/SA algorithm for the job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 1, p. 282–294, 2008.

ZHANG, C.; LI, P.; GUAN, Z.; RAO, Y. A tabu search algorithm with a new neighborhood structure for the job shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 11, p. 3229–3242, 2007.

ZHANG, C.; RAO, Y.; LI, P. An effective hybrid genetic algorithm for the job shop scheduling problem. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 39, n. 9–10, p. 965–974, 2008.

ZHANG, G.; SHAO, X.; LI, P.; GAO, L. An effective hybrid particle swarm optimization algorithm for multi-objective flexible job-shop scheduling problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 4, p. 1309–1318, 2009.

ZHANG, L.; GAO, L.; LI, X. A hybrid intelligent algorithm and rescheduling technique for job shop scheduling problems with disruptions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 65, n. 5–8, p. 1141–1156, 2015.

ZHANG, Q.; MANIER, H.; MANIER, M.-A. A genetic algorithm with tabu search procedure for flexible job shop scheduling with transportation constraints and bounded processing times. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 7, p. 1713–1723, 2012.

ZHANG, R.; SONG, S.; WU, C. A hybrid artificial bee colony algorithm for the job shop scheduling problem. **International Journal of Production Economics**, v. 141, n. 1, p. 167–178, 2013.

ZHANG, R.; SONG, S.; WU, C. A two-stage hybrid particle swarm optimization algorithm for the stochastic job shop scheduling problem. **Knowledge-Based Systems**, v. 27, p. 393–406, 2012.

ZHANG, R.; WU, C. Bottleneck machine identification method based on constraint transformation for job shop scheduling with genetic algorithm. **Information Sciences**, v. 188, p. 236–252, 2012.

ZHANG, X.; VAN DE VELDE, S. On-line two-machine open shop scheduling with time lags. **European Journal of Operational Research**, v. 204, n. 1, p. 14–19, 2010.

ZHANG, Z.-H.; BAI, D. An extended study on an open-shop scheduling problem using the minimisation of the sum of quadratic completion times. **Applied Mathematics and Computation**, v. 230, p. 238–247, 2014.

- ZHAO, F.; TANG, J.; WANG, J.; JONRINALDI. An improved particle swarm optimization with decline disturbance index (DDPSO) for multi-objective job-shop scheduling problem. **Computers & Operations Research**, v. 45, p. 38–50, 2014.
- ZHAO, F.; ZHANG, J.; ZHANG, C.; WANG, J. An improved shuffled complex evolution algorithm with sequence mapping mechanism for job shop scheduling problems. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 8, p. 3953–3966, 2015.
- ZHOU, H.; CHEUNG, W.; LEUNG, L. C. Minimizing weighted tardiness of job-shop scheduling using a hybrid genetic algorithm. **European Journal of Operational Research**, v. 194, n. 3, p. 637–649, 2009.
- ZHOU, H.; FENG, Y.; HAN, L. The hybrid heuristic genetic algorithm for job shop scheduling. **Computers & Industrial Engineering**, v. 40, n. 3, p. 191–200, 2001.
- ZHOU, Y.; LI, B.; YANG, J. Study on job shop scheduling with sequence-dependent setup times using biological immune algorithm. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 30, n. 1–2, p. 105–111, 2005.
- ZIAEE, M. General flowshop scheduling problem with the sequence dependent setup times: A heuristic approach. **Information Sciences**, v. 251, p. 126–135, 2013.
- ZOGHBY, J.; WESLEY BARNES, J.; HASENBEIN, J. J. Modeling the reentrant job shop scheduling problem with setups for metaheuristic searches. **European Journal of Operational Research**, v. 167, n. 2, p. 336–348, 2005.